

Title : Control Circuit Design for Stepping Motor

Author : Kuniaki Makabe

Publication date : May, 1987

Publisher : CQ Publishing Co., Ltd., JAPAN

5

In the bipolar driving:

There is a method to drive stepping motors, in addition to the unipolar driving that has a simple composition as described above, called the bipolar driving that improves the torque at low-speed areas although its circuit becomes more complicated.

With this bipolar driving, the driving is carried out as though currents are made to flow through the coil of the motor alternately. Fig. 2.6 shows a bipolar driving circuit called the bridge type. As can be seen in this circuit, it requires two times the number of transistors required for the unipolar driving.

Further, the way of winding the coil of the motor is also different, with such construction being used that 2 coils are wound in tiers in the same direction, and only terminals are separately taken out. Among them, the one in which 1 wire is wound continuously is called the monofilar winding, and the one in which 2 wires are simultaneously wound in tiers is called the bifilar winding, and the latter is featured by higher positioning precision due to the fact that, in the case of the bifilar winding, the 2 coils have the same inductance as shown in Fig. 2.7.

Fig. 2.5⁽³⁴⁾ 1-2 phase excitation in the unipolar driving

25

(a) Excitation sequence

Step 1

Step 2

Step 3

5 Step 4

Phase A

Phase B

Phase C

Phase D

10

(b) Movement of rotor

Step

Current

Position of rotor

15

Fig. 2.6 ⁽³⁴⁾ An example of the bipolar driving circuit

R: Resistor for preventing excessive currents

Fig. 2.7 Bifilar winding of the stepping motor

20 Rotor

Advantages and disadvantages of the unipolar driving and the bipolar driving

With the bipolar driving, although the circuit becomes more complicated as compared with the unipolar driving, the coils are thoroughly
5 exploited, and especially because the current is flowed in the alternate directions, the PM type stepping motor that uses a permanent magnet has better efficiency as a result of an increase in torque of about two times.

Further, in the case of the unipolar driving, when the current is turned OFF (is made to be in the non-excited state), diodes, zenor diodes or others
10 are used to eliminate the reverse electromotive force that flows through the coil, and as a result, the magnetic energy of the motor is consumed in such diodes or zenor diodes as well as in the coil.

Whereas in the bipolar driving, the current generated in the coil by the reverse electromotive force when it is shifted from Step 1 to Step2, goes
15 through Diode $D_4 \rightarrow \text{Coil} \rightarrow R \rightarrow D_1$ to charge Power Supply E as shown in Fig. 2.6 with the dotted line. Therefore, the magnetic energy of the motor is thus fed back to the power supply, and the bipolar driving has better efficiency than the unipolar driving in this regard as well.

ステッピングモータの 制御回路設計

実用のための基礎技術とマイコンによる制御技術

真壁國昭 著

CQ出版社

第2章

モータを運転するための基本技術

ステッピング・モータを運転するには、第1章1.2の実験で行った、手動でスイッチを切り替えるという方法もあります。しかし、モータを手動で1.8°だけ回転させたい、などという特殊な場合を除けば、手でスイッチを切り替える方法は非現実的です。実際には電子的な回路、すなわちICを組み合わせてモータの励磁回路を作ってやることになります。また、複雑な要素をもつ正確な位置決め用途に使う時などは、マイクログリッドピッチとの組み合わせによる方法も必要になります。

そこで、この章ではモータを電子的に制御するための基本技術について紹介することになります。

2.1 ステッピング・モータの相励磁とは

ステッピング・モータを駆動するときには、まずモータの相励磁について理解しておく必要があります。使おうとするモータは何相モータか、どんな励磁方法にすべきかという点を誤ると、正確な回転をさせることができません。そこで、モータの内部に少し立ち入って、モータの相励磁のしくみから考えてみましょう。

●モータの巻線構造から決まる

ステッピング・モータの駆動方法は、その巻線コイルにどのような形で電流を流すかによって区別されています。これはモータの種類によっても異なりますが、もっとも多く使われているPM型と呼ばれるステッピング・モータで、ステップ角90°の場合を例にして説明します。

図2.1がPM型4相モータの巻線構造です。ステップ角は90°ですが、角度の小さいモータでも、基本的な構造や考え方は同じです。この例の場合は、それぞれ相対する固定子(ス

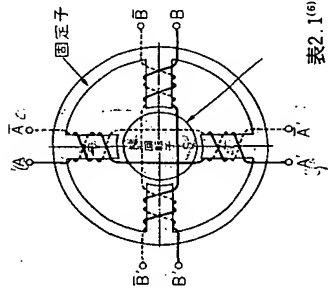
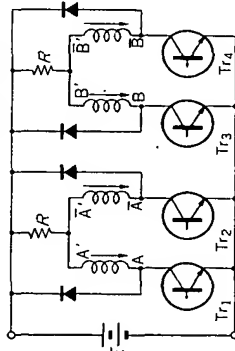
図2.1^(a) ステッピング・モータの巻線構造 (PM型)

図2.2 ユニポーラ駆動回路例

表2.1^(a) 4相モータのユニポーラ駆動

| 内 容 | ステッピング角 | 入力 | 特 徴 | 入力パルスと各相電流の関係 |
|------------------------------------|--------------------------|------|---|---------------|
| 1相励磁 常に一つの相だけに電流を流していく方式。 | θ (フル・ステップ) | P | 入力が1相のみなのでモータの温度上昇が低く、電源が小さくてよい。出力トルクは大きい。ステップしたときに減速振動が生じやすいので、広範囲のステップ・レートで回転させるときは注意を要する。 | |
| 2相励磁 常に二つの相に電流を流していく方式。 | θ (フル・ステップ) | 2P | 常に2相が励磁されるため、起動トルクが生じにくい。相切り替え時必ず1相は励磁されているので、動作時に制動効果がある。ただし、モータの温度上昇があり、1相励磁に比較して倍の電容量を必要とする。 | |
| 1-2相励磁 一つの相と二つの相を交互に電流を流していく方式。 | $\theta/2$ (ハーフ・ステップ) | 1.5P | 1相、2相励磁の中間の特徴をもち、ステップ角が1相、2相に比較して1/2になる。応答ステップ・レートは1相、2相励磁の2倍になる。 | |

2.1 ステッピング・モータの相励磁とは

テータ)の歯にコイルが2本ずつ巻いてあります。また、 A' と A' が、 B' と B' がそれぞれモン線として外部に出ているモータも数多くあります。

このモータのコイルに、電流をどのように流すかによって駆動(相励磁)の方法が異なるわけです。そして、一般にはユニポーラ駆動とバイポーラ駆動に区別することができます。

●ユニポーラ駆動とは

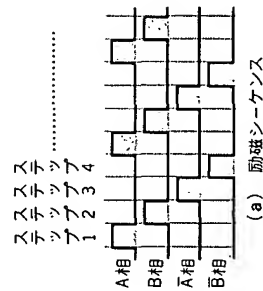
図2.2がユニポーラ駆動の回路例です。それぞれのコイルに1個のトランジスタが接続され、トランジスタをONすることで、各コイルに電流を流します。また、図を見てわかるように、コイルには一方向のみの電流($A' \rightarrow A$, $A' \rightarrow A$, $B' \rightarrow B$, $B' \rightarrow B$)しか流れません。このように、コイルに一方の電流しか流さないことからユニポーラ(片極性)駆動と呼んでいます。

この駆動方式は見方を変えと、コイルには同一時間に、A相、 A' 相あるいはB相、 B' 相の片側にしか電流を流していませんので、低速領域ではトルクが大きいくれないという欠点があります。しかし、モータの電源回路を含めて、回路構成がもともと簡単にできることから広く用いられています。

では、以下に4相モータでのユニポーラ駆動における相励磁シーケンスについて調べてみることにしましょう。4相モータには1相励磁、2相励磁、1-2相励磁と呼ばれる励磁シーケンスがあり、この方法の選択によって入力パルスとステップ角との特性が異なってきます。表2.1が4相モータにおけるユニポーラ駆動での励磁方式の特徴です。

●4相モータの1相励磁動作

図2.3に1相励磁でのモータの動きを示します。ステップ1でトランジスタ Tr_1 がONになり、 $A' \rightarrow A$ に電流が流れます。コイルに電流が流れることにより、固定子(ステータ)

図2.3^(a) ユニポーラ駆動1相励磁

(b) 回転子の動き

の歯はN, Sに励磁されます。この時、B側には電流が流れれていないので、B側のステータの歯は非励磁ですが、A側の励磁に伴い、回転子（ロータ）の永久磁石はそれぞれNとS, SとNが引き合い、安定した位置で停止します。

次にステップ2に進むと、先にONしていた Tr_1 はOFFになり、代わりに Tr_3 がONになります。 Tr_3 がONになることで、 $B' \rightarrow B$ のコイルに電流が流れ、今度は 90° ずれている固定子が励磁されます。そして、時計でいえば今まで12時の位置にあったS極が、3時の位置に入れ代わります。N極も同様に6時の位置から9時の位置に変わります。

そして、励磁位置が移動したことで、回転子も時計回りに引っぱられ、 90° 回転することになります。

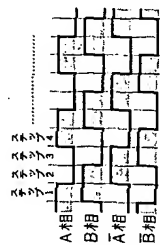
さらに、ステップ3では、 Tr_2 がONして $\bar{A}' \rightarrow \bar{A}$ のコイルに電流を流します。この時、固定子の歯は $A' \rightarrow A$ のときと同じですが、コイルの巻いてある方向が $A' \rightarrow A$ と逆なので、励磁によってできる極は $A' \rightarrow A$ の場合と逆になります。つまり、12時の位置がN極、6時の位置がS極になり、回転子も励磁極と引き合ってさらに 90° 時計方向に進みます。

ステップ4は $\bar{B}' \rightarrow \bar{B}$ のコイルに電流が流れます。そして、同様な理由で回転子は 90° 進みます。このように、ステップ1～4の励磁を繰り返すことによって、モータを 90° ずつ進めて回転させることができます。

4相モータの2相励磁動作

図2.4が2相励磁の動きです。2相励磁の場合は、A, B側のコイルが同時に1本ずつ励磁されます。

まずステップ1では、 $A' \rightarrow A$, $B' \rightarrow B$ のコイルに電流が流れます。固定子（ステータ）の極は、1相励磁のように12時、3時がS極、6時と9時の位置がN極に励磁されます。そして、その結果として、回転子（ロータ）のN極は12時と3時のS極の中間の位置で停



(a) 励磁シーケンス

| ステップ | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--------|--|--|--|--|
| 電流 | $A' \rightarrow A$ $B' \rightarrow B$ | $B' \rightarrow B$ $A' \rightarrow A$ | $\bar{A}' \rightarrow \bar{A}$ $\bar{B}' \rightarrow \bar{B}$ | $\bar{B}' \rightarrow \bar{B}$ $\bar{A}' \rightarrow \bar{A}$ |
| 回転子の位置 | | | | |

(b) 回転子の動き

図2.4^(a) ユニポーラ駆動2相励磁

止します。

次にステップ2ではA相のコイルが切り替わり、 $\bar{A}' \rightarrow \bar{A}$ に電流が流れます。そして、12時の極がN, 6時の極がSになります。その結果、回転子のN極は12時のN極と反発し、3時と6時のS極の中間位置に安定します。

このようにして、回転子は時計方向に 90° 回転するわけです。ステップ3, ステップ4でも同じように2相ずつ同じ極に励磁され、回転子の極がその中間の位置で停止しながら回転するようになります。

なお、2相励磁は1相励磁に比較して2倍の電流が流れます。しかし、コイルの2相が励磁されていますので、1相励磁に比べると停止時のオーバーバシユートやアンダシユートが小さく、過渡特性は良くなります。

● 4相モータの1-2相励磁動作

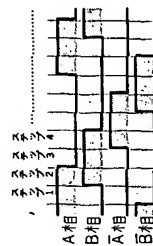
図2.5の1-2相励磁は、前述の1相励磁とを交互に繰り返すものです。したがって、回転子はステップごとに 45° 回転します。つまり、ステップ角はメーカーの表示する角の $1/2$ になります。

1-2相励磁は1相励磁と2相励磁の特性をもち合わせ、ステップ・レートは倍になります。

● バイポーラ駆動では

ステップ・モータの駆動には、前述したような簡単な構成ですむユニポーラ駆動のほかに、回路は複雑になりますが、低速領域でのトルクを改善するバイポーラ駆動と呼ぶ方法があります。

このバイポーラ駆動は、モータのコイルに交互に電流を流すようにドライブします。図

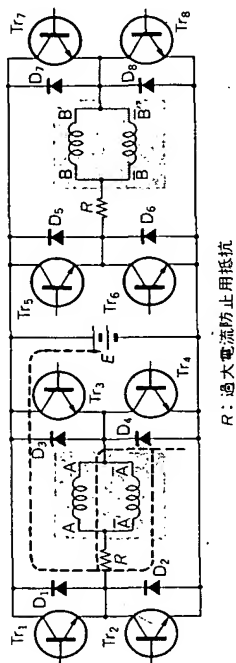
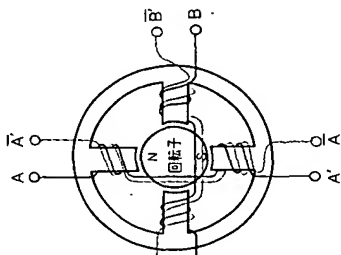


(a) 励磁シーケンス

| ステップ | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--------|--|--|--|--|
| 電流 | $A' \rightarrow A$ $B' \rightarrow B$ | $A' \rightarrow A$ $B' \rightarrow B$ | $B' \rightarrow B$ $A' \rightarrow A$ | $B' \rightarrow B$ $A' \rightarrow A$ |
| 回転子の位置 | | | | |

(b) 回転子の動き

図2.5^(a) ユニポーラ駆動1-2相励磁

図2.6⁽³⁴⁾ バイポーラ駆動回路例図2.7 ステッピング・モータの
バイファイラ巻き

2.6に、ブリッジ型と呼ばれるバイポーラ駆動回路を示します。回路を見てもわかるように、ユニポーラ駆動に比較して2倍の数のトランジスタを必要とします。

また、モータのコイルの巻き方も異なり、2本のコイルを同じ方向に重ねて巻き、端子だけを別個に取り出すような構造が用いられています。このうち、1本のワイヤを連続的に巻いたものはモノファイラ巻きと呼び、2本同時に重ねて巻いたものをバイファイラ巻きと呼んでいます。図2.7のように、バイファイラ巻きのほうが2本のコイルのインダクタンスが等しくなるので、結果として位置決め精度が良くなるという特徴をもっています。

このバイポーラ駆動にも、ユニポーラ駆動と同様に1相励磁と2相励磁、1-2相励磁があります。バイポーラ1相励磁は効率の面から使われることが少なく、2相励磁と1-2相励磁が主流です。そして、励磁方式によるステップ角の違いから、2相励磁のことをフル・ステップ駆動、1-2相励磁のことをハーフ・ステップ駆動とも呼んでいます。表2.2にバイポーラ駆動方式の特徴を示します。

2.1 ステッピング・モータの相励磁とは

表2.2 4相モータのバイポーラ駆動

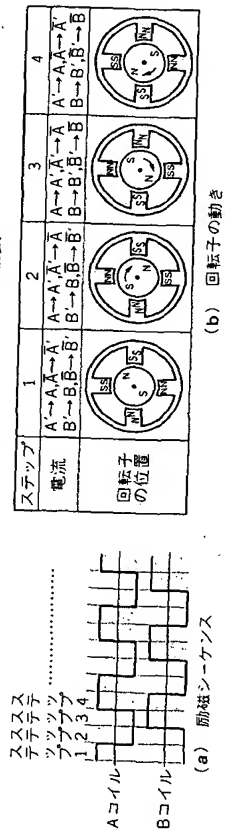
| 内 容 | ステッピング角 | 入力 | 特 徴 | 入力パルスと各相電流の関係 |
|--|--------------------------|------|---|---|
| バイポーラ 1相励磁 常に1組(2相)の相だけに電流を流す方式、(電流方向は交互に変化する) | θ (フル・ステップ) | P | 4相巻線の2相(1組)だけが励磁される方式で、角度精度がよい。電源が小さいものでよいが、2本の巻線が直列に接続されるので2倍の電圧を必要とする(バイポーラ・ドライブ共通の特徴)。ただし、全コイルの1/2しか使用してないなので、利用効率がよくバイポーラ・ドライブでは利用されていない。 | 入力パルス A相 A相 B相 B相 正方向電流 逆方向電流 |
| バイポーラ 2相励磁 常に2組の相に電流を流す方式、(電流方向は交互に変化する) | θ (フル・ステップ) | 2P | 4相巻線のすべてが励磁される方式でダンピング特性がよい。ユニポーラ・ドライブに比較して低速時のトルク特性が優れているが、高速になるとコイルが直列に接続されていいため、 L が大きき時定数が低く、逆にトルクが低くなる欠点ももっている。コイルの利用率が最も高い。 | 入力パルス A相 A相 B相 B相 |
| バイポーラ 1-2相励磁 1組の相と2組の相を交互に電流を流す方式、(電流方向は交互に変化する) | $\theta/2$ (ハーフ・ステップ) | 1.5P | 4相巻線のうち2相、4相の励磁が交互に励磁される方式で、バイポーラ1相、2相励磁の中間の特徴をもっている。ステップ角は1/2になる。ユニポーラ・ドライブに比較して複雑な制御回路を必要とする。 | 入力パルス A相 A相 B相 B相 |

●バイポーラ・フル・ステップ駆動

図2.8にバイポーラ・フル・ステップ駆動の励磁シーケンスと回転子の動きを示します。この方法は常にすべてのコイルに電流を流すものですが、シーケンス図の上半分はA'→AとA'→A'方向、下半分はA→A'、A→A'の方向に電流を流すように表現しています。もちろん、Bコイル側も同様です。

ステップ1では図2.6におけるTr₃とTr₂、Tr₆とTr₇がONし、電流はAコイル側が

図2.8^(a) バイポーラ・フル・ステップ駆動



次にステップ2では、 Tr_1 と Tr_4 、 Tr_5 と Tr_6 がON、ほかはOFFとなります。そして、ステップ1での電流とは反対方向のコイルに電流が流れます。その結果、時計であれば12時と9時がN極に、3時と6時がS極になります。また、回転子のN極が3時と6時の中間点に、S極が9時と12時の中間点で停止するようになります。

そして、以下各ステップごとにコイルに流す電流の方向を変えることによって、回転子を90°ずつ回転させることができます。

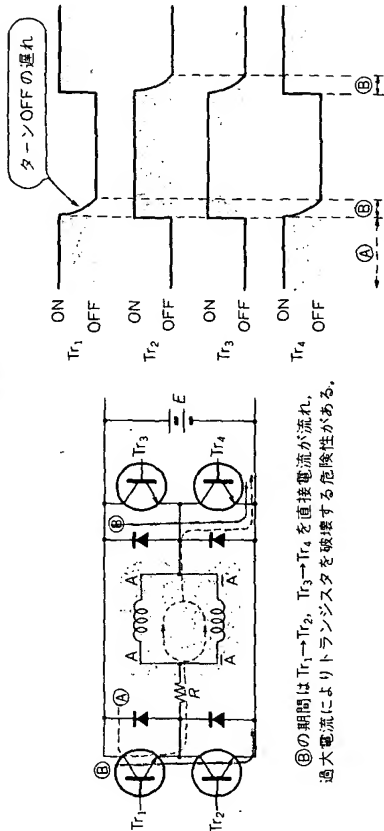
ユニポーラ駆動とバイポーラ駆動との得失

バイポーラ駆動はユニポーラ駆動に比較して回路が複雑ですが、コイルを逆はせることなく利用しており、特に電流を交互方向に流すために、永久磁石を用いたPM型ステッピング・モータでは、トルクが約2倍に増大して効率が良くなります。

また、ユニポーラ駆動では電流OFF（非励磁にする）時に、コイルに流れる逆起電力を速く消滅させるのにダイオードや定電圧ダイオードなどを用いますが、その結果モータの磁気エネルギーが、ダイオードや定電圧ダイオード、さらにコイル内で消費されることとなります。

しかしバイポーラ駆動の、ステップ1からステップ2に移行した時にコイルに発生する逆起電力による電流は、図2.6の点線に示したように、ダイオード D_1 →コイル→ R → D_1 を、通り電源 E を充電する形になります。したがって、モータの磁気エネルギーは、電源にフィードバックされるようになるわけで、この点からもバイポーラ駆動はユニポーラ駆動に比較して効率が良くなっています。

図2.9 バイポーラ駆動の注意点

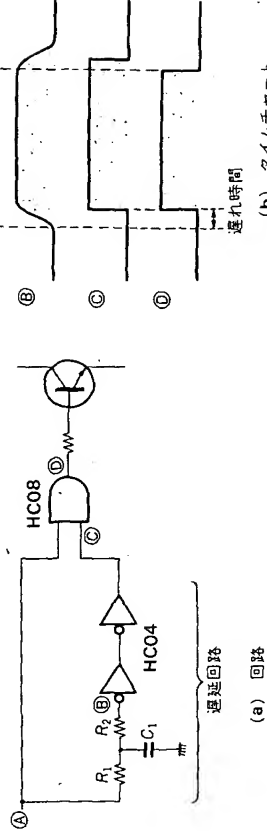


ただし、バイポーラ駆動で注意しなければならないことは、図2.9に示すように励磁相の切り替え時に生じるトランジスタのターンオフの遅れ（瞬間ではあるが）です。これは、すべてのトランジスタがONになる時間が生じることであり、場合によっては電源電流が、すべてトランジスタに流れ、トランジスタを破壊してしまう危険性があります。注意が必要です。

この防止策としては、図2.9に示した上下のトランジスタ間に過電流防止用の抵抗 R を入れるか、ステップ移行時にONするトランジスタに、それぞれ時間遅れをもたせて動作させるなどの対策が必要になります。ステップ移行時の簡単な遅延回路の例を図2.10に示します。

このように、バイポーラ駆動は性能的には多くのメリットがあるわけですが、外部回路が複雑になる傾向にあるため、一般にはユニポーラ駆動が多く利用されています。

図2.10 トランジスタのON遅延回路



相励磁方法による角度-トルク特性の違い

さて、ステッピング・モータを励磁するには、ユニポーラ駆動において、

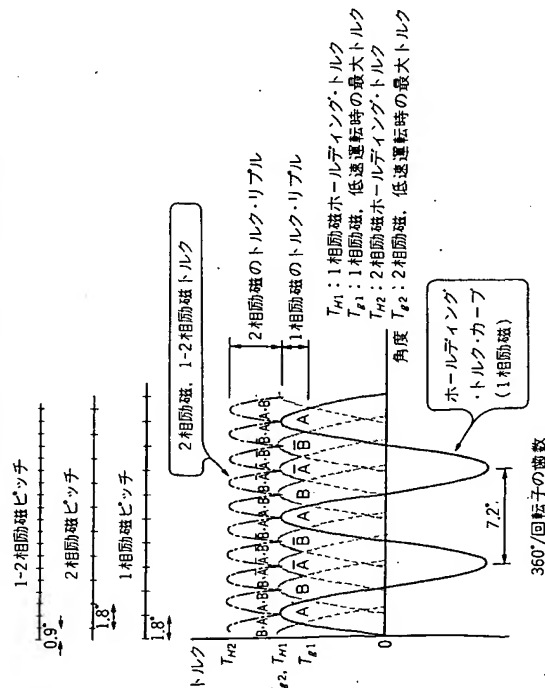
- ・ 1 相励磁
- ・ 2 相励磁
- ・ 1-2 相励磁

という主に三つの励磁方式がありました。それぞれにどんな特徴があるのかをもう少し見てみることにしましょう。

図2.11 にステッピング・モータの、1 相励磁と 2 相励磁における角度-トルク特性を示しますが、回転のピッチ間にリップル（脈動）をもっていることがわかります。この波形は正弦波で近似でき、リップルの周期は回転子の歯のピッチに等しくなります。ステップ角が 1.8° のモータでは歯数が 50 です。周期は 7.2° になり、A 相に続いて B 相、 \bar{A} 相、 \bar{B} 相の順に 1.8° ずれた形になります。

この図でわかるように、1 相励磁の場合は相切り替え時にトルクが低くなり、次の相励磁で再び立ち上がるカーブになります。また、2 相励磁では励磁相のトルクの合成になります。この部分は図では一点鎖線で示してあります。隣り合う山のピッチは 1.8° で、トルクの大きさは 1 相励磁に比べて約 $\sqrt{2}$ 倍になるのが特徴です。

図2.11⁽²⁾ 相励磁方法と角度-トルク特性の違い



また、1-2 相励磁では、2 相が励磁されている場合に一点鎖線の山に、次の 1 相励磁では谷の位置のトルクになります。したがって、トルクそのものは 2 相励磁のカーブと同じになります。

さらに、2 相励磁駆動の場合は、次の安定位置 (1.8° ピッチ) に移動する途中でトルクが低下 (谷) するポイントがあります。これに対し、1-2 相励磁駆動では、安定位置 (0.9° ピッチ) でトルクの差がありますが、移動間隔が短いので、移動途中でのトルクの谷がなく、過渡特性が良くなります。

2.2 相励磁回路の作り方

前述のようにステッピング・モータには、相の励磁方式によっていくつかの種類と励磁シーケンスの組み合わせがあります。そして、それぞれのモータは、あらかじめ設定した励磁方式に従った順序で電流を流すように制御しなければなりません。これは、ロジック IC を組み合わせることによって実現できますが、最近では専用の IC も多く使われるようになってきました。

ここでは、現在もっとも多く使用されている 4 相ステッピング・モータの制御法を中心に紹介することにします。

● 相励磁シーケンスの基本回路はシフトレジスタで作る

モータを励磁するシーケンス回路は、汎用ロジック IC で構成することができます。従来は励磁のシーケンスを作るのに RS フリップフロップや JK フリップフロップ、NAND ゲートなどで構成されることもありましたが、一般には相シフトに便利なシフトレジスタを利用することで、簡単に構成することができます。

まず、4 ビット双方向シフトレジスタ 74194 を使用した、4 相モータの 2 相励磁回路例を図 2.12 に示します。この回路は、電源 ON 時に並列入力 2 ビットに (A, B) に "H" をロードし、パルス発生回路からパルスが入るごとに、ライトカレフト (CW か CCW) にシフトします。パルス発生回路については後述しますが、基本的にはモータを回す速度を決めるためのパルス列をここに加えるわけですが、また、1 ビット (A) を "H" に、残りビット (B, C, D) を "L" にロードするように構成すると 1 相励磁回路になります。

4 相モータの 1-2 相励磁回路例を図 2.13 に示します。この回路は 8 ビットの双方向シフトレジスタ 74198 を使用しています。そして 2 相励磁の場合と同様に、電源 ON 時に並列

図2.12 シフトレジスタを使った2相励磁駆動回路

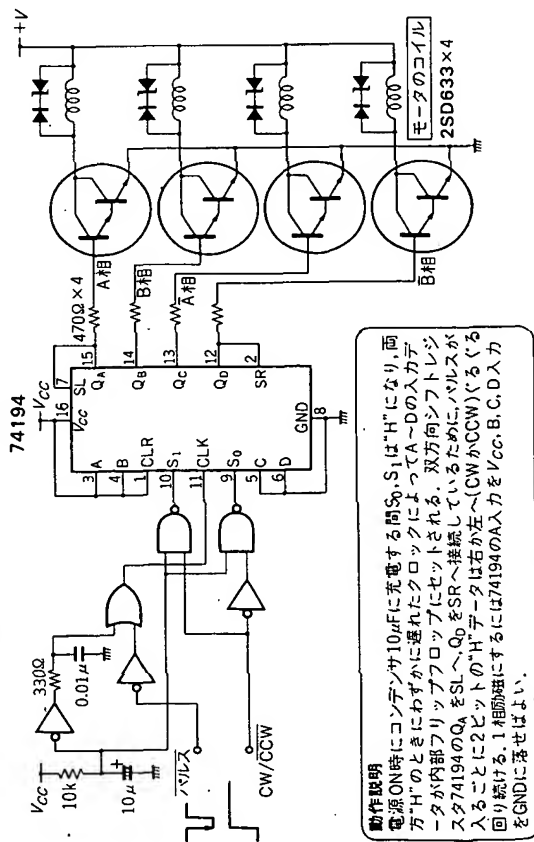
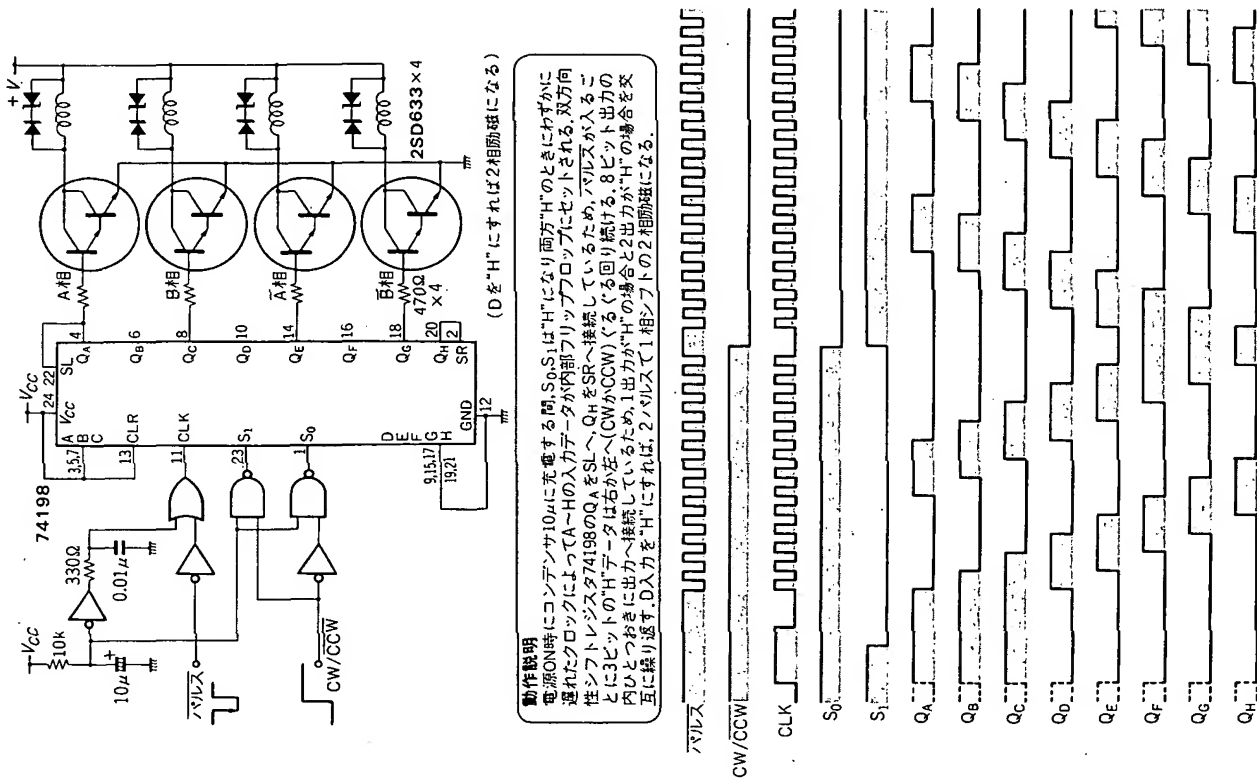


図2.13 シフトレジスタを使った1-2相励磁駆動回路



入力3ビット (A, B, C) を “H” にロードし、ライトカレフト (CW か CCW) にシフトします。また4ビット (A, B, C, D) を “H” にロードするように構成すると2相励磁回路になります。

なお、この回路では8ビット・シフトレジスタを使用していますので、出力は1ビットおき (Q_A, Q_C, Q_E, Q_G) に取り、1パルスの入力で1シフトになります。

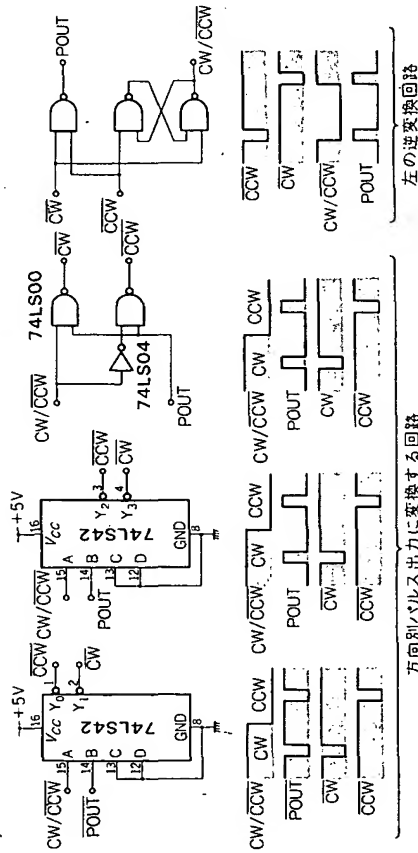
励磁パルスの加え方

ところで、図2.12と図2.13に示した回路例では、励磁回路へのパルスの加え方が、パルス入力と方向入力(CW/CCW)というようになっていました。つまり、モータの回転方向はCW/CCW信号で決め、回転速度を入力するパルスの周波数で決めようというわけですね。

しかし、場合によってはモータの駆動回路(パワー・ドライバ回路)が方向別パルス(つまりCWパルス、CCWパルスの別々の入力がある)しか受け付けないという場合があります(特に駆動回路が市販のステッピング・モータ・ドライバ・ユニットなどの時)。この場合には、この場合、パルス入力と方向入力信号とを、それぞれの方向別パルスに変換してやる必要があります。この方法を図2.14に示します。

この回路は、それぞれモータ駆動回路の前後に備えることになります。

図2.14 パルス出力の変換回路



動作説明
74LS42は、4LINE-10LINEデコーダで2進-10進変換の機能をもつIC。入力C,Dは使用しないので"1"にする。A,Bの入力状態(4種)に応じて負論理出力に変換され、Y₀~Y₃の出力のいずれかが"1"になる。

2.3 ステッピング・モータの相励磁専用IC

ステッピング・モータの相励磁を行う専用のICが数社から発売されています。たいいていは似たような機能をもっていますが、その主なものを表2.3に示します。ここでは、その中の代表的なものとしてPMM8713/8714、TD62803Pの使用例について紹介します。

表2.3 相励磁駆動用ICの例

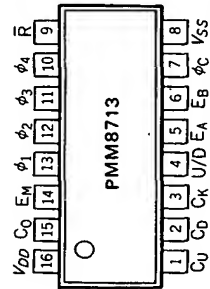
| | PMM8713 | MB8713 | PMM8714 | TD62803P | OMD240 | SDB520 |
|---------------|---------------------------------|---------------------------------|--|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 対応モータ | 3, 4相 | 3, 4相 | 5相 | 3, 4相 | 4相 | 3, 4相 |
| 励磁切り替えモード | E _A , E _B | E _A , E _B | E _A , E _B , E _C | E _A , E _B | E _A , E _B | E _A , E _B |
| モータ相切り替え | φ _c | φ _c | — | 3/4 | E _C | φ _c |
| U/D回転方向切り替え | U/D | U/D | U/D | CW/CCW | CW/CCW | U/D |
| 入力パルス UPクロック | C _U | C _U | C _U | — | P ₁ | C _U |
| 入力パルス DNクロック | C _D | C _D | C _D | — | P ₂ | C _D |
| 入力パルス・モニタ | C ₀ | C ₀ | C ₀ | CK-OUT | C ₀ | C ₀ |
| 励磁モニタ | E _M | E _M | E _M | — | — | — |
| イニシャル状態検出 | — | — | Z ₀ | — | M ₀ | M ₀ |
| OUTPUT ENABLE | — | — | φ _{OFF} | E | H ₀ | φ _{OFF} |
| リセット | R | R | R | R | R | R |
| 電源 | +4~+18V | +4~+18V | +5V | +5V | +5V | +5V |
| メーカー | 山洋電気(株) | 富士通(株) | 山洋電気(株) | 山洋電気(株) | 東芝 | 新東通信(株) |
| 備考 | | PMM8713と同じ | | TD62803と同じ | | |

なお、ステッピング・モータを駆動するには、この相励磁のほかにステップ・パルスを発生するためのパルス発生回路が必要です。しかし、この機能はこれらの専用ICには含まれていませんので注意が必要です。パルス発生回路については次項2.4で紹介いたします。

● 3相/4相モータ用IC PMM8713の使い方

PMM8713は、一般の3相/4相ステッピング・モータをコントロールするICです。図2.15がICのピン接続です。

図2.15^(a) PMM8713の構成



| ピンNo. | 機能 |
|-------|------------------------------|
| 1 | C _U 入力パルスUPクロック |
| 2 | C _D 入力パルスDOWNクロック |
| 3 | E _M 入力パルス・モニタ |
| 4 | U/D回転方向切り替え |
| 5 | E _A 励磁切り替えモード |
| 6 | E _B 励磁切り替えモード |
| 7 | φ _c 3.4相切り替え |
| 8 | V _{SS} (GND) |
| 9 | R リセット |
| 10 | φ ₁ 出力 |
| 11 | φ ₂ 出力 |
| 12 | φ ₃ 出力 |
| 13 | φ ₄ 出力 |
| 14 | E _M 励磁モニタ |
| 15 | C ₀ 入力パルス・モニタ |
| 16 | V _{DD} (+4~+18V) |

このICはC-MOSであり、4～18Vの広範囲の電源で使用できます。表2.4に示すように3相モータか4相モータか、さらに1相励磁か2相励磁、1-2相励磁かを ϕ_c と E_A 、 E_B 入力に設定することができます。また、パルスの入力方法も、方向別パルス入力と、パルス入力+方向入力とのどちらへも対応することができます。その入力設定方法を図2.16に示します。

表2.5がPMM8713の交流特性です。原理的(ICの動作として)には1MHzまでのクロック (= ステップ・パルス) を入力することができます。

PMM8713の応用回路として、4相モータ、1-2相励磁方式の例を図2.17に示します。方向別パルス入力回路で使用する場合は、各入力は正論理です。パルス発生器が負論理出力の時は、逆方向には回転しません。したがって、入力側にインバータを入れて正論理に変換する必要があります。

各相の出力電流は20mAまで流せますので、一般には駆動トランジスタを直接ドライブできます。また、 C_0 と E_M は、入力パルスの確認と励磁モニタとして使用します。

| 励磁方式 | 入 | | | | 出力 | | | |
|--------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|
| | ϕ_c | E_A | E_B | C_0 | C_k | U/D | R | C_0 |
| 1-2相励磁 | 0 | 1 | 1 | × | × | × | 0 | — |
| 2相励磁 | 0 | 0 | 0 | × | × | × | 0 | — |
| 3相励磁 | 0 | 0 | 0 | × | × | × | 0 | — |
| 1相励磁 | 0 | 0または1 | 0 | × | × | × | 0 | — |
| 1-2相励磁 | 1 | 1 | 1 | × | × | × | 0 | — |
| 2相励磁 | 1 | 0 | 0 | × | × | × | 0 | — |
| 4相励磁 | 1 | 0または1 | 0 | × | × | × | 0 | — |

×: DON'T CARE —: 不定

表2.4(16) PMM8713の機能

表2.5(16) PMM8713の交流特性

| 項目 | 記号 | 条件 | | 規格値 | | 単位 |
|----------------------|----------------------|-----------|------------------------------------|------------|--------------|-----|
| | | V_{DD} | | 最小 | 最大 | |
| 最大クロック周波数 | f_{max} | 5V 15V | $t_r = t_f = 20ns$ $C_L = 50pF$ | 1 | 2 | MHz |
| 最小クロックパルス幅 | t_{wL} t_{wH} | 5V 15V | $t_r = t_f = 20ns$ $C_L = 50pF$ | | 500 250 | ns |
| 最小リセットパルス幅 | t_{wR} | 5V 15V | $t_r = t_f = 20ns$ $C_L = 50pF$ | | 1000 500 | ns |
| 遅延時間 (シロック入力から出力) | t_{PD} | 5V 15V | $t_r = t_f = 20ns$ $C_L = 50pF$ | | 2000 1000 | ns |
| 設定時間 | t_{SET} | 5V 15V | $t_r = t_f = 20ns$ $C_L = 50pF$ | 0 | | |
| 保持時間 | t_{HOLD} | 5V 15V | $t_r = t_f = 20ns$ $C_L = 50pF$ | 250 125 | | |

図2.16(16) パルス入力の方法

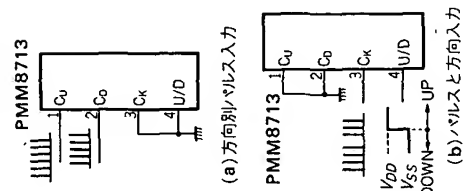
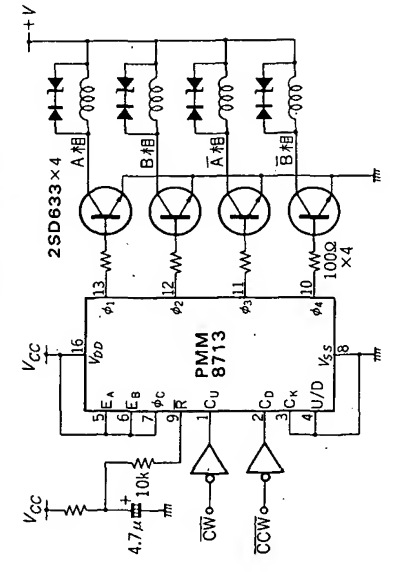


図2.17 1-2相励磁方式の駆動回路



● 5相モータ用IC PMM8714の使い方

PMM8714は、5相ステッピング・モータのコントローラです。5相ステッピング・モータというのは、3相/4相のモータにくらべて回転角度のピッチが0.72°と細かくできるのが特徴で、精度の高い位置決めを行うときに使用します。表2.6に5相モータのドライブ方式について示しておきます。

このPMM8714は、PMM8713とは異なり、PLというバイポーラ・プロセスで作られています。電源電圧はPMM8713と同様に4～18Vの広範囲で使用することができます。励磁モードは表2.7に示すように、4相、4-5相、5相、2相、2-3相、3相励磁のモードが選択できます。また、励磁OFF機能がついており、すべての相出力を“L”にすることができ、さらに、励磁モードを途中で切り替えたとしても励磁モード保全機能が働き、相出力は変化しません。したがって、2相→2-3相→3相、4相→4-5相→5相の切り替えに適用することができます。

リセット入力は励磁状態を相原点に強制時に移します。また、モータが回転動作中に相原点の励磁状態と同じ状態になった時にモニタ信号を出力するフェーズ・モニタ (相原点) 機能もついています。図2.18にPMM8714のピン接続を示します。

5相モータの励磁シーケンスは表2.8に示すとおりですが、リセット状態は表の右端の励磁状態 (4-5相励磁) では20ステップ目、5相励磁では10ステップ目) と同じになります。この状態になっているとき、相原点モニタ Z_0 は“H”レベルになります。

表2.6 5相モータの駆動方式と特徴

| ドライブ方式 | バイポーラ・スタンダード方式 | バイポーラ・ペンタゴン・ドライブ方式 | ユニポーラ・スター・ドライブ方式 |
|--------|--|------------------------------------|--|
| 励磁モード | トランジスタ数: 20 ハーフ・ステップ可能 | トランジスタ数: 10 出力段の構成から4相励磁のみできる | トランジスタ数: 5 ダブル・ステップ可能 ロー・コストにできる |
| 2相 | フル・ステップ (0.72°) | — | ダブル・ステップ (1.44°) |
| 2-3相 | ハーフ・ステップ (0.36°) | — | フル・ステップ (0.72°) ステップごとのトルク変動が小さい |
| 3相 | フル・ステップ (0.72°) | — | ダブル・ステップ (1.44°) |
| 4相 | フル・ステップ (0.72°) 最大トルクが得られる | フル・ステップ (0.72°) 優れたダンピング特性が得られる | — |
| 4-5相 | ハーフ・ステップ (0.36°) 5相モータのハーフ・ステップ駆動に最も適している | — | — |
| 5相 | フル・ステップ (0.72°) ダンピング特性が良い | — | — |

(注) フル・ステップ: 1ステップでモータのステップ角と同じ回転を行う
ハーフ・ステップ: 1ステップでモータのステップ角の半分の回転を行う
ダブル・ステップ: 1ステップでモータのステップ角の2倍の回転を行う

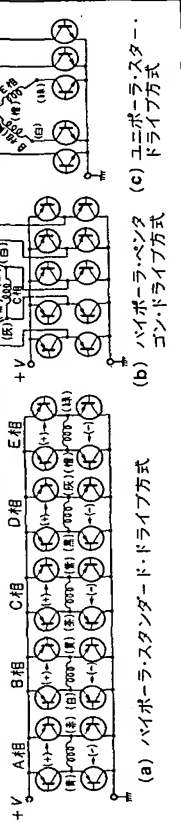
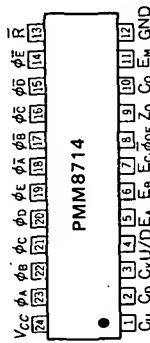


図2.18⁽¹⁾ PMM8714の構成



(a) ピン接続

(b) ピンの名称

表2.7⁽¹⁾ PMM8714の機能

| 励磁方式 | 入 | 力 | 出 | 力 |
|--------|----------------|----------------|----------------|---------------------------------|
| 2相励磁 | E _A | E _B | E _C | φ _A ~ φ _E |
| 2-3相励磁 | 0 | 0 | 1 | |
| 3相励磁 | 0 | 0 | 1 | |
| 4相励磁 | 0 | 1 | 0 | |
| 5相励磁 | 0 | 0 | 0 | |

表2.8⁽¹⁾ 5相モータの励磁シーケンス

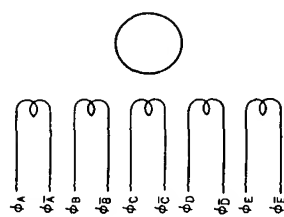
| パルス相 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| φ _A | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| φ _B | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| φ _C | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| φ _D | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| φ _E | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| φ _A | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| φ _B | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| φ _C | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| φ _D | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| φ _E | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CW | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| CCW | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

(a) 4-5相励磁

| パルス相 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| φ _A | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| φ _B | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| φ _C | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| φ _D | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| φ _E | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| φ _A | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| φ _B | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| φ _C | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| φ _D | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| φ _E | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| CW | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| CCW | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

(b) 5相励磁

このほかにも2相、2-3相、3相、4相励磁があるが省略。



(c) 構成

出力電流を大きくした3相/4相モータ用IC TD62803P

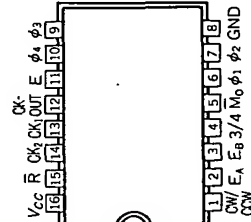
TD62803PはPMM8714のプロセスと同じ1 μ Lで作られています。機能は3相/4相モータの相励磁のほかに、最大400mAの出力電流を取り出すことができますので、小型のステッピング・モータであれば直接に駆動することが可能になるという特徴をもっています。

図2.19にピン接続図を、図2.20にブロック図を示します。

クロック入力とは方向別クロック入力（2相クロック方式）と、パルス入力+方向別入力（正逆転コントロール）の方式が選択できます。

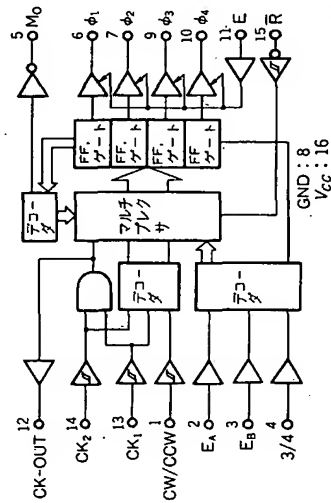
表2.9に入力パルスの選択表、相励磁の選択表を示します。

3相、4相の切り替えを行うときは、必ずリセット・パルスを \bar{R} に入力し、いったんリセット・モードにしてから切り替えを行うようにします。また、E入力により $\phi_1 \sim \phi_4$ の出力をイネーブルにするか、すべてOFFにするかを制御することができます。

図2.19⁽²⁸⁾ TD62803Pの構成

(a) ピン接続

(b) ピンの名称

図2.20⁽²⁸⁾ TD62803Pのブロック図表2.9⁽²⁸⁾ TD62803Pの機能

| CK1 | CK2 | CW/CCW | 機能 | EA | EB | 3/4 | 機能 |
|----------------|----------------|--------|-----|----|----|-----|--------------|
| \overline{L} | H | L | CW | L | L | L | 1相励磁駆動 |
| \overline{L} | L | L | 禁止 | H | L | L | 2相励磁駆動 |
| H | \overline{L} | L | CCW | L | H | L | 1-2相励磁駆動 |
| L | \overline{L} | L | 禁止 | H | H | L | テスト・モード全出力ON |
| \overline{L} | H | H | CCW | L | L | H | 1相励磁駆動 |
| \overline{L} | L | H | 禁止 | H | L | H | 2相励磁駆動 |
| H | \overline{L} | H | CW | L | H | H | 1-2相励磁駆動 |
| L | \overline{L} | H | 禁止 | H | H | H | テスト・モード全出力ON |

(a) 入力パルス選択

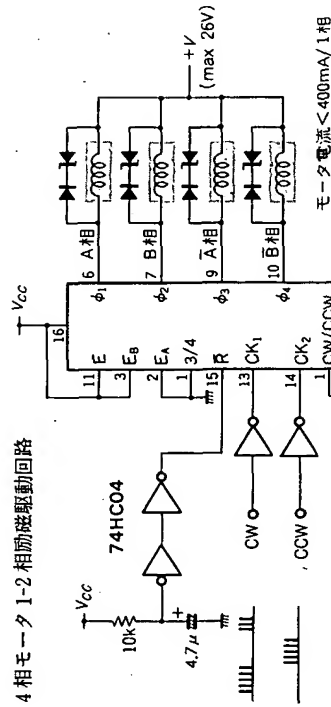
(b) 相励磁選択

なお、このICは16ピンですが、横幅が通常の24ピンDIPと同じ寸法(15.24mm)になっていきますので、使用するときには注意が必要です。

図2.21にTD62803Pを使った4相モータ駆動回路例を示します。モータの駆動電流は1相当たり400mA以下のもに適用します。また、出力耐圧(推奨動作条件)が26Vですので、モータの電圧は安全をみて、20V以下で使用するようになります。

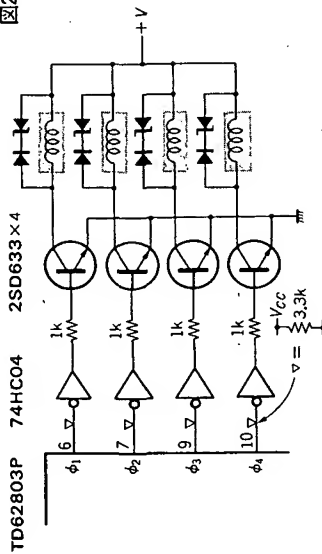
モータの電流が400mAを超えるときは、外部に駆動用のパワー・トランジスタを必要としますが、パワー・トランジスタの回路は負論理となりますので、いったんインバータを通した後、パワー・トランジスタを駆動するようにします。また、ICの出力はオープン・コレクタ・タイプですので、インバータとの間にはプルアップ抵抗が必要になります。図2.22に外部トランジスタが必要になったときの回路を示します。

図2.21 4相モータ1-2相励磁駆動回路



TD62803P

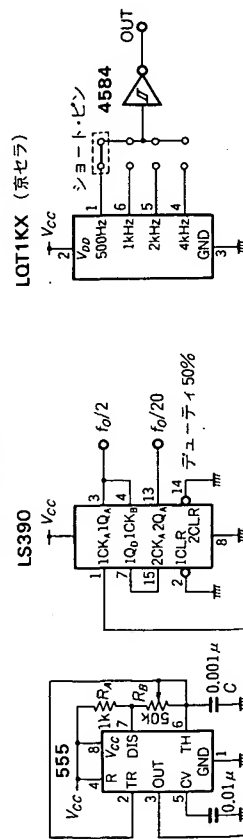
図2.22 外部パワー・トランジスタの駆動例



2.4 パルス発生回路の構成法

ステッピング・モータは、たんに回転させるのだけであれば簡単なパルス発生回路、たとえば図2.23に示すような方形波発振回路を用意し、前述の相励磁回路へ供給すればよいのですが、実際には回転速度の調節や回転量の調節ができなければ意味がありません。そのため、ステッピング・モータを実用的に制御するには、回転速度を決めるためのパルス発生器が必要となります。

図2.23 簡単なパルス発生回路



さらに低い周波数を希望する場合は、LQT100×(50, 100, 200Hz)を利用するか、(a)のカウンタIC LS390を用いて分周する方法などがある。

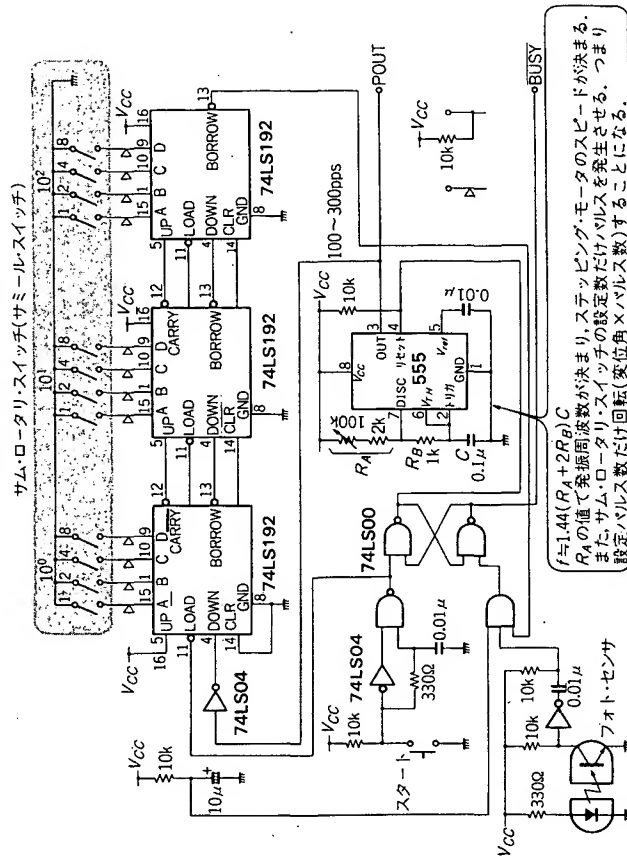
LQTの出力は水晶発振のため正確な周波数が得られるが、ドライブ能力が小さいので、必ずC-MOSかLS TTLで受けること。

(b) タイムベース・モジュール(水晶発振)を用いたパルス発生回路

●定速・定量のパルス発生回路

モータを定速で決められた量だけ回転させるという用途は数多くあります。ここでは一定速度(任意の半固定設定)でパルスを発生し、設定した分だけのパルス列を発生するとストップするパルス発生回路を紹介します。図2.24がこの定速・定量パルス発生回路です。

図2.24 定速・定量パルス発生回路



④ スタートパルス

⑤ LOADパルス

⑥ RESETパルス

⑦ BUSYパルス

⑧ POUT

⑨ BORROW (MSB)

⑩ フォトリタラプダ

によるパルス

1. サム・ロータリ・スイッチを016にセットしてあるものとする。
2. フォトリタラプダが動作(しや光)すると⑥に身パルスが生じ、⑥、⑩、⑪は点線のようになる。
3. ⑤のパルス・デューティ("H"と"L"の時間比)は発振周波数で異なる。

回路の動作は次のようになります。まず、電源 ON で RS フリップフロップがリセットされ、タイマ IC である 555 からのパルスははじめは発生しません。そして、スタート・スイッチを押すと、ON の初期にディジタル (サム・ロータリ) スイッチの設定値が 10 進のアップ/ダウン・カウンタ (LSI92) にロードされ、さらに RS フリップフロップもセットされます。そして、このフリップフロップの出力は、555 からのパルスの発生を許可します。555 からのパルスは、前述したモータの駆動回路と、アップ/ダウン・カウンタのダウン入力に入り、設定値から次第にカウンタ・ダウンしていきます。そして、カウンタの全桁がゼロになれば、次のパルスでアップ/ダウン・カウンタの最上位桁のボロー出力が RS フリップフロップをリセットし、パルス発生を停止させます。つまり、ステッピング・モータには設定したパルス数 (ここでは 3 桁なので 0~999) が、タイマ 555 の発振周波数 f によるパルス・レートで送り込まれるわけです。

また、アップ/ダウン・カウンタの内容がゼロになる前に、ステッピング・モータのところにつけたフォト・センサ (リミット・スイッチ) をさげると、パルス発生が停止しモータも停止します。

この回路では、フォト・センサをさげても再スタートは可能です。したがって、モータを逆方向に回転させる場合には駆動回路に逆方向信号を出力し、スタート・スイッチを ON にします。

パルス設定の桁数はアップ/ダウン・カウンタ LSI92 を継続接続すればよく、容易に増減できます。また、BUSY 信号をチェックすれば終了がわかります。

パルス発生周波数 (パルス・レート) はタイマ IC (555) の 7 ピンに接続されている抵抗 R_A を調整します。これはモータの動作中の一定周波数のパルスですから、当然のことながら自起動周波数領域で使用するようにします。逆のことをいえば、定速・定量パルス発生器によるステッピング・モータの駆動は、自起動周波数領域の使用に限定されます。

加減速のパルス発生回路

図 2.24 の回路は、定速・定量パルス発生回路であるため、モータの自起動周波数領域内でしか使用できません。この回路を発展させて、モータの自起動周波数領域内で発振を開始し、徐々に周波数を上昇 (スロー・アップ) させて、設定した量だけのパルスを送り込み、その後徐々に周波数を下げる (スロー・ダウン) するような方式をとれば、モータをより広範囲に利用することができるようになります。

加減速のパルス発生には V-F コンバータ回路を用います。V-F コンバータというのは

は、入力電圧の変化によって発振周波数がリニアに変わりますので、入力電圧を徐々に上昇および下降させれば、スロー・アップ/スロー・ダウンの周波数パターンを得ることができるといえます。

回路構成のブロック図を図 2.25 に示します。電圧の上昇/下降は、コンデンサと抵抗による充/放電カーブを利用します。動作は次のようになります。

スタートと同時に、リレーの接点を +10 V 側に倒します。すると R_0 を通してコンデンサ C が充電され、徐々にコンデンサの端子電圧が上昇します。そして、電圧上昇に従って V-F コンバータからの発振周波数も上昇します。ただしコンデンサ C の充電電圧が、設定している発振開始・停止の検出電圧よりも低い場合は、V-F コンバータの発生パルスは、スタート-減速ポイント・カウンタには入力されません。

コンデンサ C の充電電圧が発振開始電圧を越え始めるとゲート回路が開かれます。そして、スタート-減速ポイント・カウンタがカウンタ・ダウンを開始します。カウンタが設定されたパルス数をカウントすると、最終桁のボロー信号によって、今度は V-F コンバータのパルスを減速ポイント-停止カウンタ側に切り替えます。また、同時にリレーの接点を R_0 側に倒します。

コンデンサ C に充電された電荷は R_0 を通して放電されます。そして、それに従ってコンデンサ C の端子電圧も徐々に低下し、電圧低下によって V-F コンバータからのパルス周

図 2.25 加減速パルス発生回路のブロック図

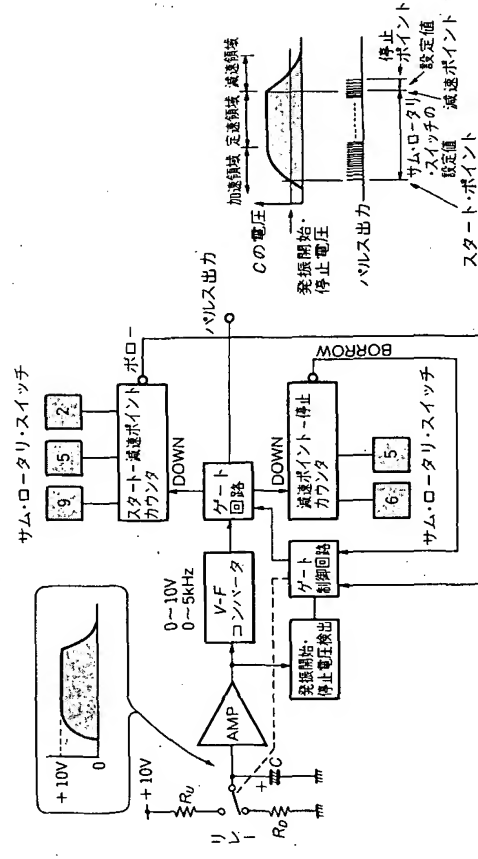
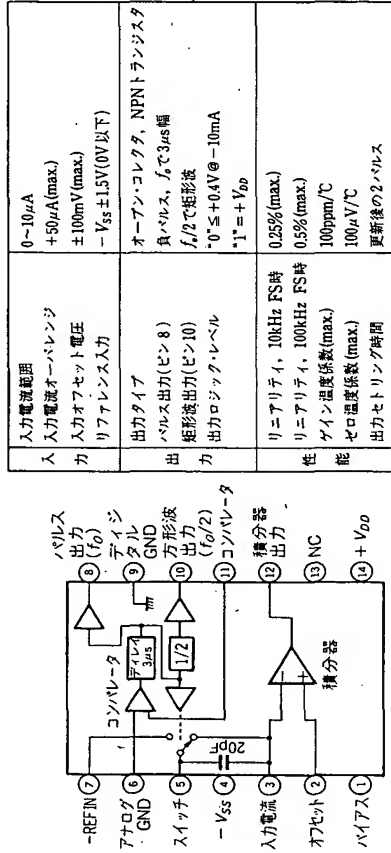


図2.27^(a) V-F コンバータ VFQ 3 の構成



(a) ピン接続図

(b) 主な特性

係は図2.29 のようになります。

この図において、コンデンサ端の電圧の上昇は、 $e_i = V_C$ の電圧を印加した場合の出力電圧 e_o の波形を示し、下降曲線は $e_i = 0$ にした場合の放電電圧波形です。

この二つの曲線は、

$$e_o = V_C \left\{ 1 - \exp \left\{ -\frac{t}{CR} \right\} \right\} \quad (2-1)$$

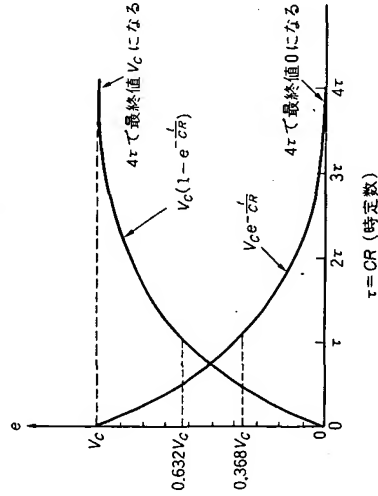
$$e_o = V_C \exp \left\{ -\frac{t}{CR} \right\} \quad (2-2)$$

の式で表されます。

図2.28 CR 積分回路



図2.29 積分回路の特性



また時定数 τ は、

$$\tau(s) = C(F) \times R(\Omega) \quad (2-3)$$

になります。そして、時定数 τ に相当する電圧は、充電波形の場合が $0.632 V_C$ (63%)、放電波形の場合が $0.368 V_C$ になります。また、充電あるいは放電電圧が、最終値 V_C および 0 になるには 4τ の時間後になります。

さて、図2.26 の回路では、充電電のために R の値が個別に調整できるようにしてあります。したがって、加減速のカーブが広範囲に選択できます。図2.26 の例で、

$$R_0 + VR_0 = 4.7 \text{ k}\Omega, R_0 + VR_0 = 9 \text{ k}\Omega$$

$$C = 3.3 \mu\text{F}$$

の場合の充電電圧と V-F 変換後のパルス波形を写真2.1 に示します。実験での最大スピードの調整は 1 V にしてありますので、定速パルスの周波数は約 500 pps になっています。

スロー・アップ時間は、

$$4\tau = 4 \times 3.3 \times 10^{-6} \times 9 \times 10^3 = 118 \times 10^{-3} (s) = 118 \text{ ms}$$

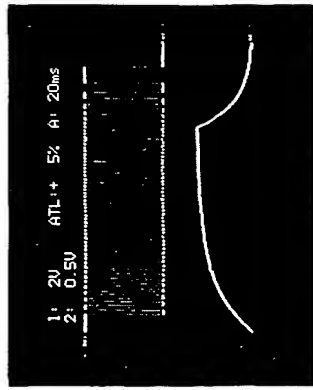
スロー・ダウン時間は、

$$4\tau = 4 \times 3.3 \times 10^{-6} \times 4.7 \times 10^3 = 62 \times 10^{-3} (s) = 62 \text{ ms}$$

になります。

このような指数関数曲線によるスロー・アップ、スロー・ダウンで注意しなければならぬのは、スロー・ダウン初期の周波数変化が大きいので、この部分でミス・ステップを起こしやすいということです。したがって、定速のステップ・レートが高い場合は、スロー・ダウンの時定数を長くしてやるように調整します。

写真2.1 V-F 変換後のパルス波形

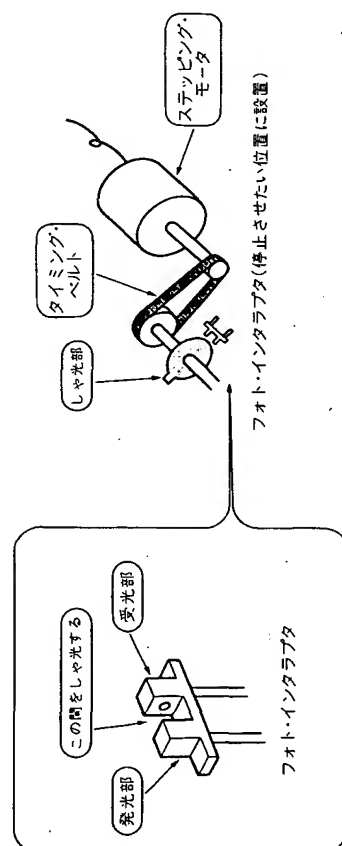
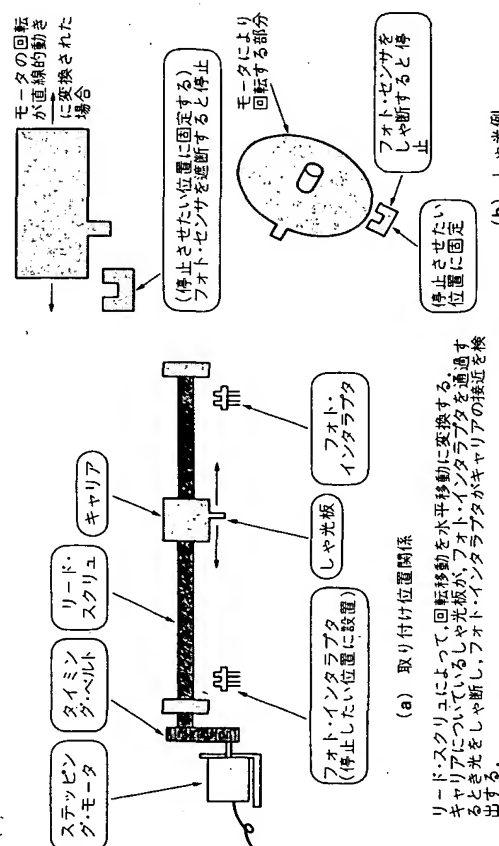


コラム リミット・スイッチの使い方

ステッピング・モータを使った位置決め装置では、リミット・スイッチの利用が欠かせません。目的は、

- ・モータを停止させたい位置
 - ・CW/CCW 位置の確認
- です。そのためのリミット・スイッチとしてはフォト・インタラプタがよく使用されます。図2. Aにリミット・スイッチの使用例を示します。

図2. Aにリミット・スイッチの使用例を示します。



(c) フォト・センサとステッピングモータの組み合わせ例（回転移動の場合）

第3章

モータの電源回路とパワー・ドライバ技術

ステッピング・モータを駆動するための基本的な回路技術を第2章で紹介したわけですが、実際の現場でモータを動かすとすると、用途によっては、モータのコイルを励磁するためのパワー・ドライバ回路や電源回路の構成法が、モータの利用効率に大きく影響することになります。これは、モータのコイルがL性（インダクタンス）であること、さらにモータの大きさによっては、数A以上の供給電流を必要とするからです。

そこで、本章ではステッピング・モータのパワー・ドライバ回路と電源回路の構成、さらに効率を上げるためのドライバ技術について述べることにします。

3.1 モータ駆動電源の設計法

●基本的な駆動電源

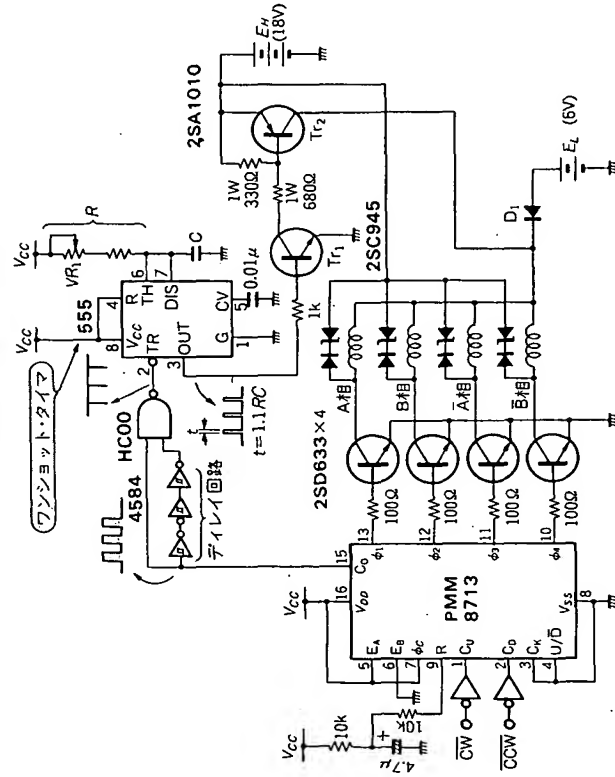
ステッピング・モータを駆動するには直流電源が必要ですが、最も簡単な方法は一定電圧の直流電源を用意し、これをモータの駆動電源とする方法です。第1章で行った実験は、すべてこの方法で、一般には定電圧駆動法と呼んでいます。この方法は電源回路も簡単であり、コストも低くて便利ですが、第1章1.3でも説明したように、モータの定格電圧と同じ電源で駆動したのでは、出力トルクや応答の面から、モータの性能を十分に引き出すことができません。

つまり、モータの巻線抵抗を R 、巻線インダクタンスを L 、モータ外部での接続抵抗を R_C とすると、モータに流れる電流の立ち上がりの時定数 τ は、

$$\tau = \frac{L}{R_C + R}$$

となります。そこで、 R_C を大きくすることによって、モータの時定数 τ が小さくなり、その結果、電流の立ち上がりが速くなってモータのトルク特性が改善されます。

図3.3 1相励磁, 2電源駆動回路



Tr_2 がONになると、ダイオード D_1 のカソード側の低電圧電源 (E_L) の電圧より高くになり、低電圧電源は逆バイアスされ、このほかからの電流は流れません。そして、ワンショット・タイマがOFFになると Tr_2 もOFFになり、今度は D_1 が順方向にバイアスされ、低電圧電源よりの電流がモータに流れ出すというわけです。

ワンショット・タイマの出力ON時間は、モータの定数 τ 程度にします。ただし、ステップ・レートの高い周波数では、高電圧電源がONしている時間の占める割合が多くなりますので、ワンショット・タイマの出力ON時間は最高ステップ・レートよりも短くしなければなりません。そのためにワンショット・タイマの出力ON時間は、可変抵抗 VR_1 で調整できるようにしておきます。

2相/1-2相励磁における2電源駆動回路

ところで、図3.3の例では1相励磁のため、高電圧電源は各巻線に共通でON/OFFしました。しかし、2相励磁や1-2相励磁では、各相に個別に電流を流してやらなければなりません。また、ステップが切り替わっても励磁相が変わらない巻線があるため、すでに低

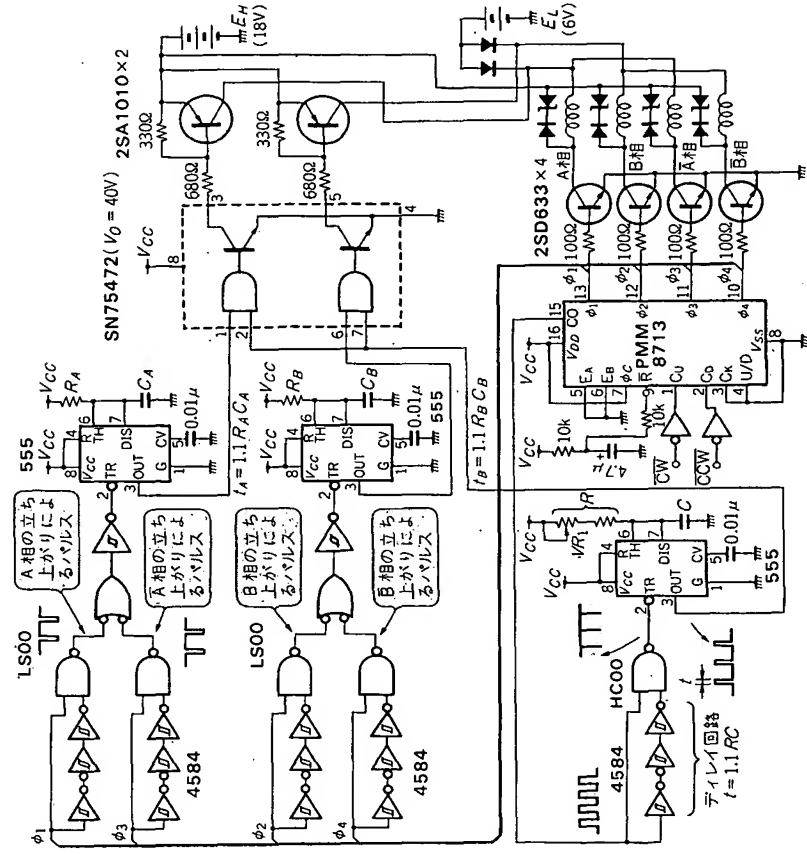
電圧電源で動作している相に対して、再び高電圧がかからないような工夫が必要です。

図3.4に、2相励磁における2電源方式の具体例を示します。高電圧電源の制御を行うトランジスタは、A相とB相側のそれぞれに単独で必要になります。

すでに第2章で示した2相駆動のステップを見ると、A相、 \bar{A} 相は互いに反転した動作になっています。B相、 \bar{B} 相も同様です。したがって、CW方向のステップでは \bar{A} 相の立ち上がり、CCW方向のステップではA相の立ち上がりで高電圧電源が動作すればよいことがわかります。

この立ち上がりパルスを利用してワンショット・タイマ用のストロブ信号を作り、ワンショット・タイマの出力がONの間だけ、高電圧電源が印加されるようにトランジスタ

図3.4 2相励磁, 2電源駆動回路

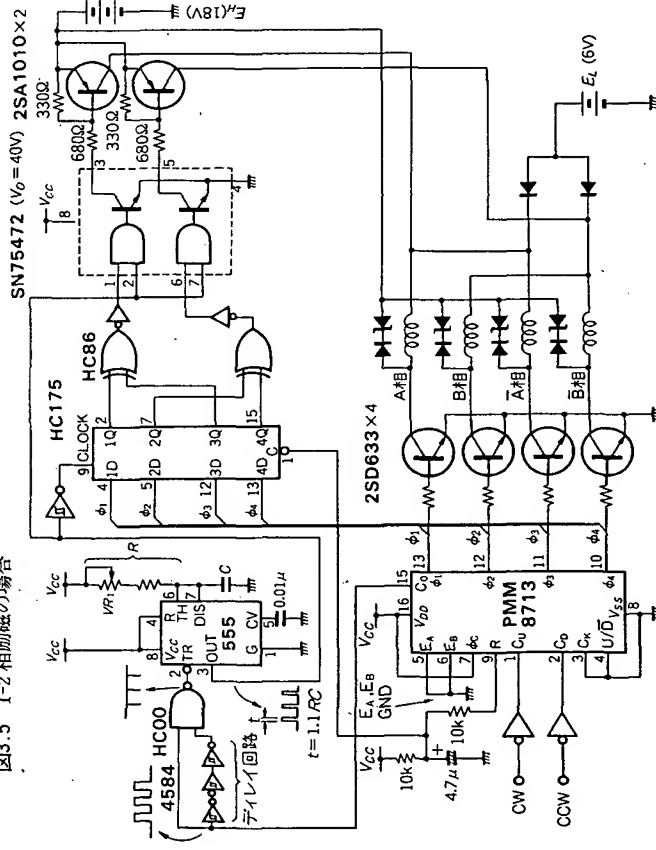


を制御しています。また、このワンショット・タイマの出力がONしている間のみトランジスタがONするような回路でも制御が可能です。しかし、これだとそれぞれのワンショット・タイマの時間差が生じやすく、A相、B相では高電圧電源が印加される時間が異なることとなります。

そこで、この問題を選けるために、1相励磁と同様に、モータ出力パルスから作られたワンショット・タイマの出力とのANDを取って、A相側、B相側どちらとも同じ時間だけ高電圧電源が印加されるようにします。

1-2相励磁でも同様の方法をとることができますが、ワンショット・タイマを使用しない1-2相励磁の方法を図3.5に示します。この方法は、高電圧駆動を必要とする1ステップ前の励磁状態が“L”になっていることを利用し、この励磁状態をラッチしておき、そのデータによって次のステップで高電圧電源の制御を行うものです。この場合のラッチのクロックは、ワンショット・タイマの出力パルスを反転させて行います。そしてラッチの出力データは、EORゲート（排他的論理和）で処理すれば、所定のステップでA側とB側とのそれぞれのトランジスタをONすることができます。

図3.5 1-2相励磁の場合



3.2 ドライブ・トランジスタ回路の設計

●基本回路の考え方

ステッピング・モータを駆動する場合、小型のモータであれば特にパワー・ドライブ回路の設計が問題になることはありません。しかし、少し大きめのモータになると、トランジスタや周辺回路部品の選び方に注意する必要があります。

ここでは、代表的な駆動回路におけるパワー・トランジスタ、および周辺部品の選択方法について考えてみることにしましょう。ドライブ回路の基本を図3.6に示します。

この回路において、 R_1 はすでに述べたように電氣的時定数を小さくし、電流の立ち上がり特性を改善するための抵抗です。また、 R_2 は電流の立ち下りの時定数を小さくするための抵抗です。

パワー・トランジスタの選定を行うには、第2章で述べた励磁回路の仕様を決定したあと、抵抗や電源電圧などの条件を決める必要があります。ここでは中型ステッピング・モータ 103-770-1（山洋電気）を例にして考えてみましょう。図3.7がモータの仕様です。

▶設計仕様を決める

励磁電流 I_L 、最大ステップ・レート N_m/sec 、さらにドライブ回路の入力信号条件を決めます。例えば、ステッピング・モータを 103-770-1 に決めたとすると、モータの特性より励磁電流は $I_L=1A$ になります。

▶ R_1 を求める

最大ステップ・レート N_m/sec で応答するには、モータ巻線の電氣的時定数 τ は次の式を満足しなければなりません。

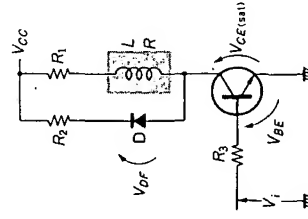
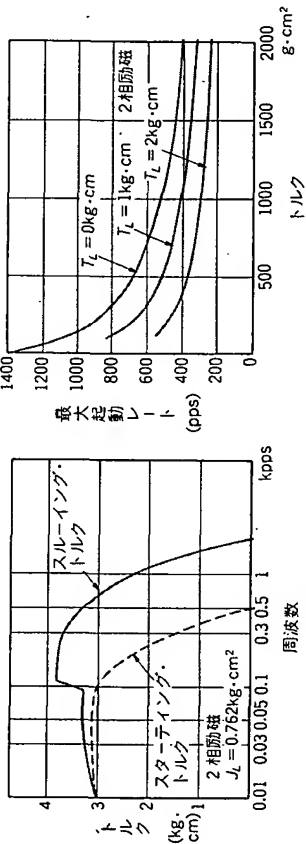


図3.6 モータのパワー・ドライブ回路（1相分）

図3.7(14) ステッピング・モータ 103-770-1 の仕様

| 型名 | 角度 単位 (deg) | 精度 SPECIAL (deg) | 電圧 (V) | 1相あたりの 電流 (A/φ) | 1相あたりの インダクタンス (mH/φ) | 入力 (W) | ホルティ ング・トルク (kg·cm) | ロータ イネーション (g·cm ²) | 重さ (kg) |
|-----------|----------------|------------------------|-----------|-----------------------|-----------------------------|-----------|---------------------------|---------------------------------------|------------|
| | | | | | | | | | |
| 103-770-1 | 1.8 | ±0.054 | ±0.09 | 5.1 | 9.0 | 10 | 4.3 | 105 | 0.57 |

(a) 仕様



(b) トルク・周波数特性

(c) ロード・イネーション・スターティング・レート

$1/N_m \gg \tau = L / (R_1 + R) \dots\dots\dots (3-1)$
 L はモータ巻線のインダクタンスで、103-770-1 では 9 mH になります。また、 R はモータ巻線の抵抗値で 5.1 Ω になっています。したがって、(3-1)式より R_1 は、

$$R_1 \gg N_m \cdot L - R \dots\dots\dots (3-2)$$

となります。

さらに、 R_1 に発生する最大電力損失 P_{D1} は、

$$P_{D1} = I_L^2 \cdot R_1 \text{ (W)} \dots\dots\dots (3-3)$$

となります。 R_1 の許容損失は、これよりも余裕をもって決定することになります。

このようにして、(3-2)式より R_1 を算出しますが、最大ステップ・レート N_m の値によっては、数 Ω 程度でも条件を十分満足している場合があります。

また、時定数 τ をできる限り小さくしようとして R_1 を大きくすれば、当然のことながら電源電圧が高くなり、電力損失 P_{D1} も大きくなりますので実用的には限度があります。したがって、 R_1 の値は使用する電源電圧から逆に制限を受ける場合があります。ここでは電源電圧は任意のものが得られるとして話を進めます。

R_1 を 10 Ω とすると、(3-3)式より $P_{D1} = 10 \text{ W}$ になりますので、 R_1 の許容値としては安全度をみて 20 W 程度のものを使用します。

▶ R_2 を求める

R_2 は、図3.6(a)における抵抗 R_1 が(3-2)式を満足しない場合に、電流の立ち下がり時間を短縮するのに用います。しかし、 R_1 が(3-2)式を十分に満足していれば省略することが可能です。 R_2 の計算は次のようになります。

$$R_2 \gg N_m \cdot L - (R_1 + R) \dots\dots\dots (3-4)$$

R_2 に発生する最大電力損失 P_{D2} は、

$$P_{D2} = \frac{R_2 L I_L^2}{2(R_1 + R_2 + R)} \text{ (W)} \dots\dots\dots (3-5)$$

となります。

以上の計算から、ここでは R_2 を 100 Ω とします。 R_2 はパワー・トランジスタの耐圧 V_{CE} に影響しますので、 R_1 と同様にあまり高抵抗を使用することはできません。

▶ 電源電圧 V_{CC} を求める

電源電圧 V_{CC} は、

$$V_{CC} = (R_1 + R) I_L + V_{CE(\text{sat})} \dots\dots\dots (3-6)$$

$V_{CE(\text{sat})}$ は、トランジスタのコレクタ・エミッタ間の飽和電圧で、通常 $V_{CE(\text{sat})} = 0.3 \sim 1 \text{ V}$ 程度です。しかし、トランジスタを内部で継続接続したパワー・ダーリントン・トランジスタを使用する場合は数 V 程度になりますので注意してください。電源電圧 V_{CC} は、

$$V_{CC} = (10 + 5.1) \cdot 1 + 1 = 16 \sim 19 \text{ V}$$

となります。

▶ R_3 を求める

ドライバのための制御信号に TTL バッファを用いるとすれば、TTL の $V_{OH} = 2.4 \text{ V}$ 、 $I_{OH} = 5.2 \text{ mA}$ として、

$$R_3 \leq (V_{OH} - V_{BE}) / I_{OH} \dots\dots\dots (3-7)$$

$$R_3 \leq (2.4 - 0.6) / 5.2 \times 10^{-3} \approx 350 \Omega$$

となります。なお R_3 の値はトランジスタの h_{FE} の値によっても範囲が大きく違ってきます。

▶ トランジスタの選定

トランジスタには次の条件を満足するものを選びます。

$$\left. \begin{aligned} V_{CBO} &\geq \xi (V_{CC} + R_2 I_L) \\ I_C &\geq \xi \cdot I_L \\ P_C &\geq (V_{CE(\text{sat})} \cdot I_L) \\ h_{FE} &> K \cdot I_L / I_B \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3-8)$$

ここでは安全係数 (>1.5), K はオーバードライブ・ファクタ (1.5~3) です。 $\xi =$

3, $K=3$ とすれば,

$$V_{CE} \geq 3 \cdot (18 + 100 \times 1) = 350 \text{ V}$$

$$I_C \geq 3 \times 1 = 3 \text{ A}$$

$$P_C \geq (3 \times 1) = 3 \text{ W}$$

$$h_{FE} > 3 \times (1/5.2) \times 10^{-3} \approx 600$$

の条件にあったパワー・トランジスタを選定します。もし、1個の素子で上式の条件を満たす足らない場合は、複数個のトランジスタを並列、あるいはダーリントン接続して用いるようにします。前記の例では、2SD633 (ダーリントン型パワー・トランジスタ) などが妥当です。

なお、トランジスタの規格表に V_{CEO} (コレクタ-エミッタ間逆耐圧) が記載されていないことがあります。この値が不明の場合には V_{CBO} (コレクタ-ベース間逆耐圧) の約 1/2 を V_{CEO} の目安とすればよいでしょう。

▶ ダイオードDの選定

モータの逆起電圧吸収用のダイオードDの選択は、逆方向耐電圧 V_R , および順電流 I_O によって決めることになり、図3.6においては、

$$\left. \begin{aligned} V_R &\geq \xi \cdot V_{CC} \\ I_O &\geq \xi \cdot I_L \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3-9)$$

を満足するダイオードを選びます。

図3.8 定電圧ダイオードを使う例

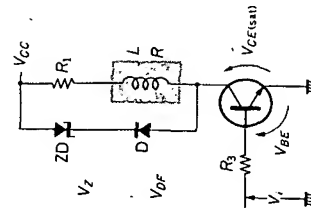
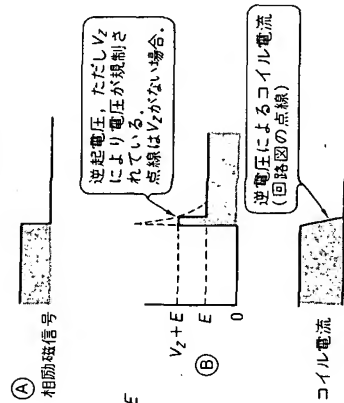


図3.9 モータ・コイルへの逆起電圧



● 定電圧ダイオードを使う回路では

図3.8は、図3.6における R_2 の代わりに定電圧ダイオードを用いた駆動回路です。この回路では、図3.6の説明のうち、 R_1 とトランジスタの選定方法が異なってきます。

▶ 定電圧ダイオードZDを求める

ステッピング・モータのコイルを励磁しているトランジスタは、ON → OFF になったときに、コイルに図3.9のような逆起電圧が発生し、コイルの電流はすぐには0になりません。トランジスタがOFFになってからコイルの電流が0になるまでの時間を t_f とすると、

$$t_f \approx \frac{-L}{R} \ln \left(\frac{V_Z}{V_Z + I \cdot R} \right) \dots\dots\dots (3-10)$$

になります。ここで V_Z は定電圧ダイオードのツェナ電圧、 L はコイルのインダクタンス、 R はコイルの巻線抵抗です。

また、コイルの電流が0になるまでの変化の傾斜を直線で近似すると、この時の平均電流は $I/2$ になり、 t_f 時間内の定電圧ダイオードの平均損失 P_R は、

$$P_R = \frac{t_f}{2} \cdot I \cdot V_Z \dots\dots\dots (3-11)$$

で表すことができます。

電流が0になるまでの時間は、(3-10)式よりZDのツェナ電圧が高ければ高いほど短くなります。こうすると(3-11)式より定電圧ダイオードのパワー損失が増大してしまいます。

定電圧ダイオードで比較的手しやすい電圧のものは20~30V程度です。そこで、前述のモータ103-770-1を例にして、 $V_Z = 20 \text{ V}$ として t_f を求めてみます。

$$t_f = \frac{-L}{R} \ln \left(\frac{V_Z}{V_Z + I \cdot R} \right) = \frac{-9 \times 10^{-3}}{5.1} \ln \left(\frac{20}{20 + 1 \times 5.1} \right) \approx 400 \mu\text{s}$$

また、定電圧ダイオードの平均損失 P_R は(3-11)式より、

$$P_R = \frac{0.4 \times 10^{-3}}{2} \times 1 \times 20 \approx 4 \times 10^{-3} \text{ (W)} \dots\dots\dots (3-12)$$

となります。

この定電圧ダイオードの平均損失は、励磁の変化1回当たりですので、実際の損失はステップ・レートによって大きく違ってきます。また、同じステップ・レートであれば、相励磁の方式によっても異なります。いまステップ・レートを f (pps) として考えると、巻線がON → OFFを繰り返す周期 t_R は、1相励磁と2相励磁では、

$$t_h = \frac{4}{f} \dots \dots \dots (4 \text{ ステップで1回 ON} \rightarrow \text{OFF の状態が生じる})$$

1-2 相励磁では、

$$t_h = \frac{8}{f} \dots \dots \dots (8 \text{ ステップで1回 ON} \rightarrow \text{OFF の状態が生じる})$$

で求めることができます。

したがって、定電圧ダイオードの損失 P_{ZD} は、

$$P_{ZD} = P_F \times \frac{1}{t_h} \dots \dots \dots (3-13)$$

で求められることになります。

仮に最大ステップ・レート を 3 kpps とすると、2 相励磁においては、

$$t_h = \frac{4}{3 \times 10^3} \div 1.3 \times 10^{-3}$$

これを (3-13) 式に代入すると、

$$P_{ZD} = \frac{4 \times 10^{-3}}{1.3 \times 10^{-3}} \div 3 \text{ (W)}$$

になります。

一般に入手しやすい定電圧ダイオードの許容電力損失は 1/2 W クラスです。電力損失 P_{ZD} を満足する定電圧ダイオードが入手できない場合は工夫が必要です。例えば、図3.10のようにパワー・トランジスタのコレクタとベース間に定電圧ダイオードを接続して使います。こうするとパワー損失の大きい定電圧ダイオードを作ることができます。

このようにして、トランジスタを利用した定電圧ダイオードのツェナ電圧 V_Z (m) は、

$$V_Z \text{ (m)} = V_Z + V_{BE} = V_{CE}$$

$$V_Z : \text{定電圧ダイオード ZD のツェナ電圧}$$

$$V_{BE} : \text{パワー・トランジスタのベース-エミッタ間電圧 } (\approx 0.7 \text{ V})$$

になります。

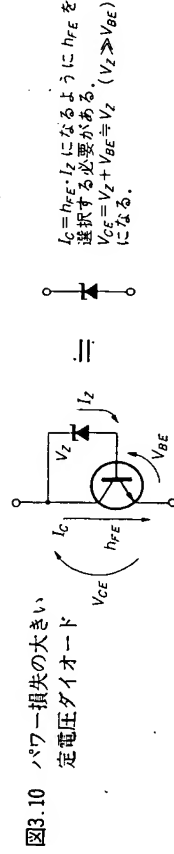


図3.10 パワー損失の大きい
定電圧ダイオード

▶ トランジスタの選定

図3.8におけるトランジスタの選定方法は次のようになります。

$$\left. \begin{aligned} V_{CE0} &\geq \xi (V_{CC} + V_{DF} + V_Z) \\ I_C &\geq \xi \cdot I_L \\ P_C &\geq (V_{CE \text{ (sat)}} \cdot I_L) \\ h_{FE} &> K \cdot I_L / i_B \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (3-14)$$

ここで、 V_{DF} はダイオードDの順方向電圧、 V_Z はツェナ電圧です。それぞれ $V_{DF} = 0.7 \text{ V}$ 、 $V_Z = 20 \text{ V}$ として計算してみると、

$$V_{CE0} \geq 3 \cdot (18 + 0.7 + 20) = 116 \text{ V}$$

その他の値は図3.6の例と同じ結果になります。したがって、図3.6の抵抗+ダイオードの回路に比較して、パワー・トランジスタの V_{CE0} が低いものなのですという利点が出てきます。

3.3 効率を大幅に改善する定電流チョップ駆動

● 定電圧駆動の欠点

ステッピング・モータを基本的に動作させる方法、および高速運転するためのモータのコイル電流の立ち上がりを改善する方法をいくつか紹介しましたが、定電圧電源による駆動では、直列抵抗と高電圧回路の組み合わせのために、モータの電力消費以外に、直列抵抗によるむだな電力消費がありました。また2電源駆動方法では、電圧の異なった電源が必要になるなどの欠点がありました。

ところで、定電圧電源でも図3.1に示したようなシリーズ制御型電源のほかに、最近では効率の良いスイッチング・レギュレータ電源が多く利用されるようになりました。実はモータの駆動方法にも、スイッチング技術を利用した効率の良い方法があります。これが、PWM 制御を使った定電流チョップの技術です。この方法は回路は複雑になりますが、最近では専用 IC も多く市販されており、今後、トルクの大きいモータや高速駆動のモータを使用する時に主流になるものと考えられています。

PWM 制御とは

まず、効率の良いスイッチング制御の元になっている PWM 技術から紹介しておくことにしましょう。

るフライホイール・ダイオードD₄が、モータのコイルとグラウンドとの間に接続されている点です。

コンパレータ回路の基準電圧 (V_{REF}) 入力には、モータのコイルを含めた開ループで構成される自励発振電圧か、外部で発振させた波形を入力させます。この与え方によって、自励式と他励式とに分かれています。

他励式の空電流チョップパ

図3.13の他励式定電流チョッパでは、基準電圧入力には直流の基準電圧 V_{REF} に三角波の交流信号を重畳させた電圧を用います。まず説明をわかりやすくするために、電流検出用抵抗 R_s を仮に 1Ω として話を進めましょう。

基準電圧入力端子 V_{REF} には、1V の直流電圧に小さい振幅の三角波が重畳された電圧を与えます。そして、 V_{REF} はコンパレータのインバーティング (-) 入力に、モータの電流検出電圧 V_s はノン・インバーティング (+) 入力に接続しておきます。

きて、モータの電源をONにすると、コイル電流が徐々に流れ始めます。この時点では V_S の電圧はまだ V_{REF} に入力された電圧より低いので、コンパレータの出力 V_O は“L”レベルになっています。そして、 V_O はANDドライバに入力され、励磁トランジスタ T_1 をON にしています。すると、モータの待定数後にはコイルの電流が立ち上がり、モータの電流検出電圧 V_S が1V近辺になります。そして V_S が V_{REF} よりも高い電圧になると、コンパレータの出力 V_O は“H”になり、 T_1 がOFFになります。 T_1 がOFFになると今度は V_S が低下し、コンパレータ出力 V_O が“L”になり、 T_1 がONになるようなフィードバック

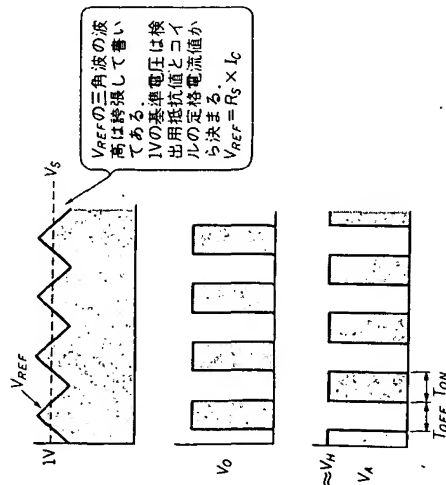


図3.14 入力信号とOPアンプ出力、コイルの負荷電圧波形

がかかります。

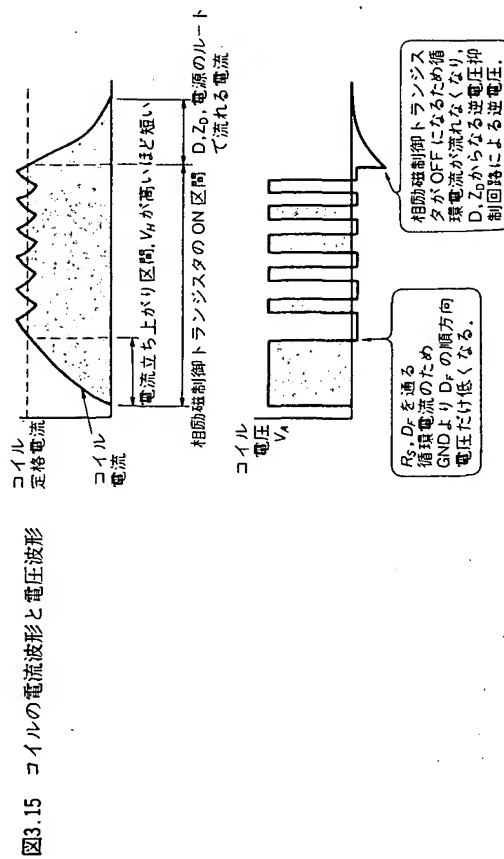
このようにして、 V_S と V_{REF} の電位がほぼ同じになるように保たれると、 V_O の出力波形は図3.14のような方形波になります。

●フライホイール・ダイオードの効果

さて、以上のような動作状態において、 T_1 がONのときは、モータのコイル電流は電源から T_1 を通して流れます。しかし、 T_1 がOFFになると、コイルには逆起電圧が発生します。ところが、コイルとグラウンド間にはダイオード D_F が接続してあるため、逆起電力による電流は点線のように循環し、コイル間を流れることになります。

この循環電流は次第に減少し、その結果 V_S の電圧も下降します。そして、 V_S が V_{REF} を下まわると、コンパレータにより V_O が “L” レベルになり、再び T_{H1} が ON になります。このようにして、この回路は ON/OFF を繰り返すわけですが、この ON/OFF タイミングの周波数を 5 kHz から 30 kHz 程度にすると、ダイオード D_F による循環電流のために、コイルに流れる電流のリプルはコイルの L 分によりほとんどなくなるのです。つまり、トランジスタのスイッチングによる ON/OFF のすき間を、コイル電流としては逆起電力による循環電流によってカバーしてしまうのです。そのような意味で、このダイオードのことをフライホイール・ダイオードと呼んでいます。

図3.15にPWM駆動におけるコイルの電流、電圧波形を示します。



PWM 駆動回路の特性

トランジスタのON/OFF周波数は、 T_{r1} のOFF時の循環電流を有効に利用できるように決めますが、あまり低かったり、自励式で周波数が不安定動作になったりすると、モータの振動や騒音の原因となりますので注意が必要です。

また、基準電圧に重畳させる三角波の波高値が低いほど頻繁にON/OFFを行うので、コイルの定電流性は良くなるのですが、外部のノイズなどの影響を受けやすくなり、スイッチングに誤動作を伴うなどの欠点もでてきます。

PWM 駆動における、モータのコイルにかかる平均電圧 V_L は、トランジスタのON/OFFの時間比率で表すことができます。

$$V_L = V_H \times \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}} \quad \dots\dots\dots (3-15)$$

つまり、(3-15)式の結果 (V_L) がモータの定格電圧になればよいわけですから、電源にはモータ・コイルの定格電圧よりも高い電圧 (V_H) を用いてスイッチングを行うと、コイルに定格電圧を印加したような状態ができるわけです。

また、相励磁の制御トランジスタ (図3.13では省略) がONになったときは、電流検出電圧 V_S は基準電圧 V_{REF} よりも低いので、コイルには高い電圧 (V_H) が印加されます。したがって、モータへの電流の立ち上がりが速くなり、モータの高速化に寄与します。そして、電流が定格値にほぼ等しくなると T_{r1} がON/OFFし、電流も常に一定になるように動作するわけです。

PWM 駆動における、コイルに印加される電圧と電流の関係を図3.15に示していますが、制御トランジスタがONしている期間に T_{r1} を流れる電流を I_S とすると、 I_S とコイルに流れる電流 I_C との関係は次式で表すことができます。

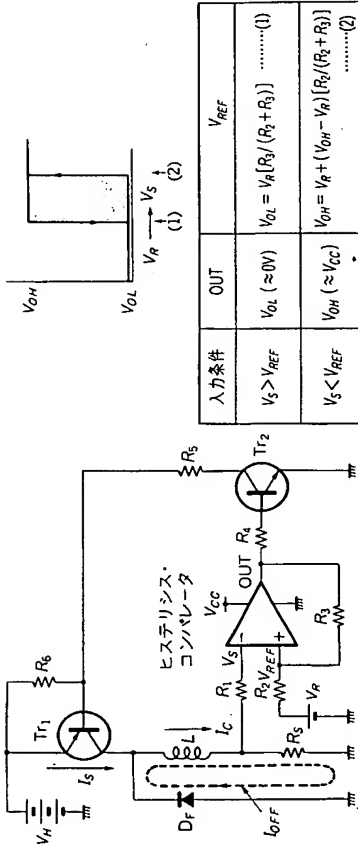
$$I_S = I_C \times \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}} \quad \dots\dots\dots (3-16)$$

つまり (3-16) 式より、モータに流れる電流 I_C は、定電圧駆動の消費電流の $[T_{ON}/(T_{ON} + T_{OFF})]$ に抑えられることがわかります。PWM 駆動が電力効率の良い方式であることが理解できると思います。

自励式の定電流チョップパでは

図3.16に自励式定電流チョップパ制御の基本回路を示します。基本的には前述の他励式とよく似ています。しかし、図3.13の他励式駆動回路では、基準電圧 V_{REF} に三角波またはの

図3.16 定電流チョップパ回路 (自励式)



こぎり波を与えています。その代わりに図3.16の自励式定電流チョップパ制御回路では基準電圧 V_R に定電圧を与え、コンパレータの出力を正帰還するようにしています。

回路の動作は次のようになります。電源が印加されると基準電圧 V_{REF} よりも電流検出電圧 V_S が低いので、コンパレータの出力は“H”レベルになり、トランジスタ T_{r2} がONになります。その結果 T_{r1} のベース電流が流れ、 T_{r1} がONしてモータのコイルに電流が流れ始めます。そして、 V_S の電圧が上昇し、 V_S と V_{REF} とが同じになるまで T_{r1} がON電流を流し続けるところは、他励式の動作と同じです。

さて、 V_S が V_{REF} より高くなると、コンパレータの出力は“L”になり、 T_{r2} と T_{r1} は共にOFFになります。その結果、コンパレータの出力電圧がほぼ0Vであれば、 V_{REF} 入力端子の電圧は、 $V_{REF} = V_R [R_3 / (R_2 + R_3)]$ になり、当然コンパレータの出力が“H”のときの V_{REF} よりも低い電圧になります。

さらに T_{r1} がOFFになった瞬間、コイルには逆起電力が発生し、電流検出抵抗 R_3 、フライホイール・ダイオード D_F を通って循環電流 I_{OFF} が流れます。また I_{OFF} が減少するに従って V_S も低下します。そして V_S が V_{REF} より低くなると、再びコンパレータの出力が“H”レベルになり、 T_{r2} と T_{r1} がONになって、電源よりコイルに電流が流れるというわけです。

コンパレータの出力が“H”の時の電圧を V_{OH} とすると、 V_{REF} の電圧は、 $V_{OH} > V_R$ の関係より、 V_{OH} と V_{REF} の電位差を R_2 と R_3 で分圧した形になります。つまり、

$$V_{REF} = V_R + (V_{OH} - V_R) [R_3 / (R_2 + R_3)]$$

このように、 V_{REF} は T_{r1} がOFFの時よりも高い電圧となり、 V_S が V_{REF} になるまでコイル

に電流が流れます。その結果、 T_{r1} はON/OFFを繰り返し、コイルにリプルを含んだ電流が流れます。

この時、 V_{REF} の電圧変化が小さいほど、ON/OFFを繰り返し、モータには一定の電流が流れるようになります。この様子を図3.17に示します。

モータのコイルに加わる平均電圧は、他励式駆動の(3-15)式と同じで、

$$V_L = V \times \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}}$$

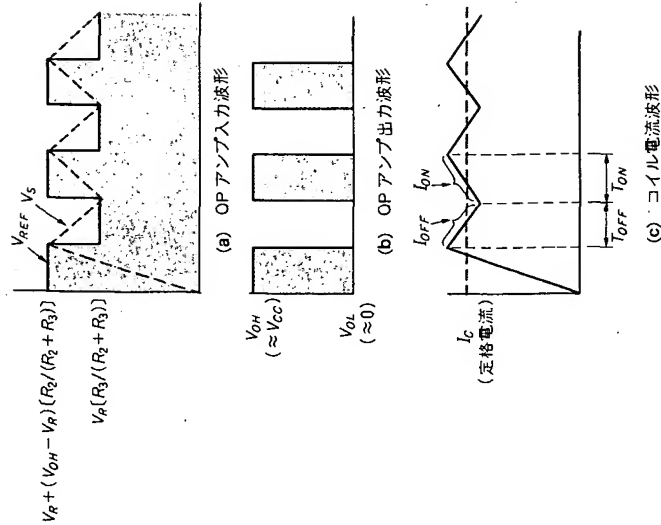
になります。また、電源からコイルに流れる平均電流 I_S も、

$$I_S = I_C \times \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}}$$

になり、他励式定電流チョップパと同じ効果が得られます。

このように、自励式定電流チョップパ回路は、チョッピング周期がモータのコイルを含む閉ループで構成される自励発振回路になっています。したがって、チョッピング周期はモータの時定数 τ 、電源電圧変動、基準電圧 V_R の変動などが影響し、場合によっては可聴周

図3.17 自励式チョップパの波形



波数領域のチョッピングが生じ、騒音の原因になることもあります。もちろん、この欠点を除去した製品も開発されています。

3.4 定電流チョップパ駆動専用ICの利用

●専用ハイブリッドICが多い

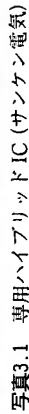
PWM 制御を利用した定電流チョップパは、ステッピング・モータ駆動の効率を飛躍的に向上させますので、高速でトルクの大きいモータの駆動においては主流になりつつあります。とはいえ、前述したような回路をトランジスタや汎用ICによるディスクリート部品で作るのは大変なので、最近ではステッピング・モータ駆動専用に使われたICが多く使われています。

ただ、ICとはいえパワー回路を含むために、いわゆるモノシックICというわけにはいかず、ハイブリッドIC (チップ部品を使用) で構成されているものが多いようです。ここでは、この定電流チョップパ型ICの代表としてハイブリッドICを使用する例について紹介しましょう。表3.1が定電流チョップパ専用ICの一例です。

ここで紹介するSI7300A (サンケン電気) は、ユニポーラ駆動用の定電流チョップパIC

表3.1(19) PWM 制御定電流チョップパ方式のIC

| 項目 | 型名 | SI7200E | SI7230E | SI7200M | SI7115B | SI7300A |
|-------------------|----|----------------------------|----------------------------|-----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 駆動方式 | | バイポーラ | バイポーラ | バイポーラ | ユニポーラ | ユニポーラ |
| 電源電圧 (max) (min) | | 50V 20V | 50V 20V | 40V | 40V | 42V |
| 出力電流 I_O (max) | | 1.0A | 2.5A | 1.0A | 1.5A | 1.5A |
| 逆起電圧解消回路 | | 回路内蔵 | 回路内蔵 | 回路内蔵 | 回路内蔵 | 外付けタイオードによる |
| 励磁入力 (4相) 電流 | | 1.6mA | 1.6mA | 1.6mA | 出力電流によって 入力電流、電圧が異なる 1.0~2.0mA | 出力電流によって 入力電流、電圧が異なる ~max 10mA |
| 制御回路 | | 制御用IC SI7201Aとベア で使用 | 制御用IC SI7201Aとベア で使用 | 内蔵 外部トリガ・ パルス必要 | 内蔵 発振回路内蔵 ≒21kHz | 内蔵 発振回路内蔵 ≒21kHz |
| 制御回路用電源 (補助電源) | | SI7201A +20~50V | SI7201A +20~50V | +5V | 内部で作って いる | +5V |
| 外形寸法 | | 45×21×7 | 45×21×7 | 65×30×7.8 | 72×40×9.0 | 65×30×7.8 |



このICの定電流チョップ制御方式は、前項で説明した方式とは回路構成および制御方法が少し異なっています。

SI7300Aの基本回路構成を図3.18に示します。基準電圧 V_{REF} は固定になっており、モータ・コイルの電流検出側の入力にヒステリシスをもたせるように、正帰還抵抗 R_2 が接続されています。また、 V_{REF} には外部よりトリガ・パルスが入力できるようにになっています。このトリガ・パルスは、トリガ・パルス発振回路より一定周期の信号を与え、チョッピンク周波数を固定させるためのものです。

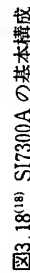


図3.19⁽¹⁸⁾ SI7300Aの動作波形

この定電流チョップ方式は、外部トリガによるチョッピング時に、コンパレータにヒステリシス電圧をもたせています。したがって、ノイズ・マージンを大きくとることができること、基準電圧 V_{REF} が直流電圧であるため、三角波やのこぎり波による方式と比較して、定電流特性に優れているなどの特徴をもっています。また、チョッピングの周期は外部発振回路で固定されていますので、自励式のようなチョッピング周期の変動によるモータの騒音は解消されます。

SI7300Aの電気的特性を表3.2に示します。図3.20がブロック図です。この図より、

図3.21⁽¹⁹⁾ SI7300Aの等価回路[illegible]

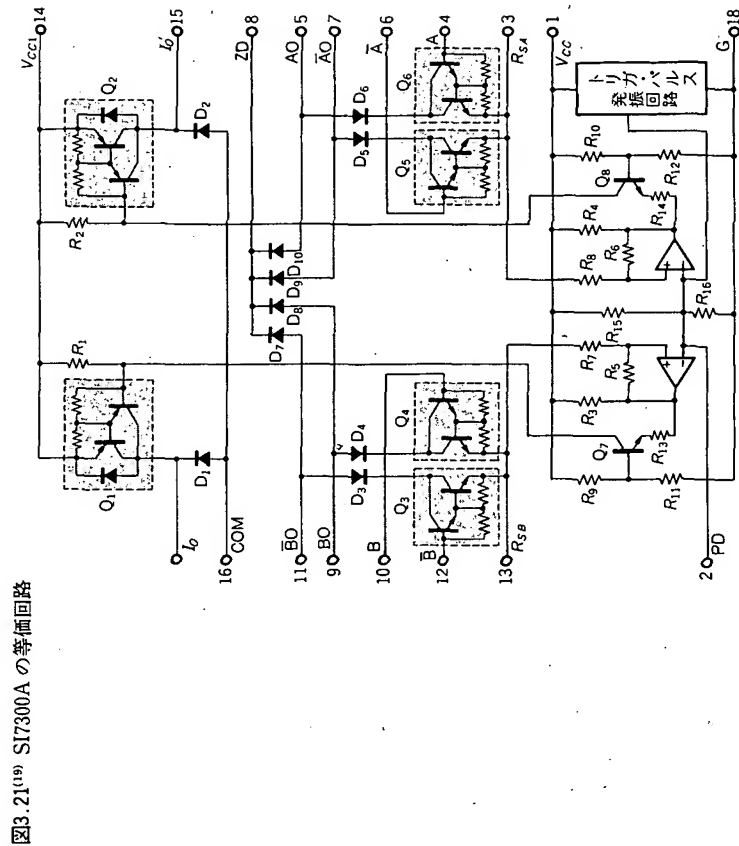
☒ 3.20(19)

図3.21が等価回路です。図3.18の基本回路と比較してみると、より理解が進むと思います。図3.21の Q_1 と Q_2 が図3.18の Tr_1 に相当します。 $Q_3 \sim Q_6$ は相励磁切り替え用のトランジスタで、図3.18では省略してあります。 Q_7 と Q_8 は Tr_2 に相当するものです。トリガパルス発生回路も内蔵しており、表3.2から約21 kHzのパルスを発生していることがわかります。また、基準電圧は $V_{CC}(=5V)$ を R_5 と R_6 によって分圧したものであり、この基準電圧を変化させることで、出力電流を変えることができます。この基準電圧は外部(2番ピン)に端子が出ていますので、この2番ピンとグラウンド(18番ピン)との間に抵抗 R_x を並列に接続すると、合成抵抗 R_0 は、

$$I_{OH\ (max)} \doteq \frac{1}{R_s} (0.233 \cdot V_{CC2} - 0.026) A \quad \dots\dots\dots (3-17)$$

$$I_{OH\ (min)} \doteq \frac{1}{R_S} \cdot (0.214 \cdot V_{CC2} - 0.021) \text{ A} \quad \dots\dots\dots (3-18)$$

ただし, V_{cc2} は補助電源電圧 ($\approx 5\text{ V}$)

図3.21⁽¹⁹⁾ SI7300Aの等価回路

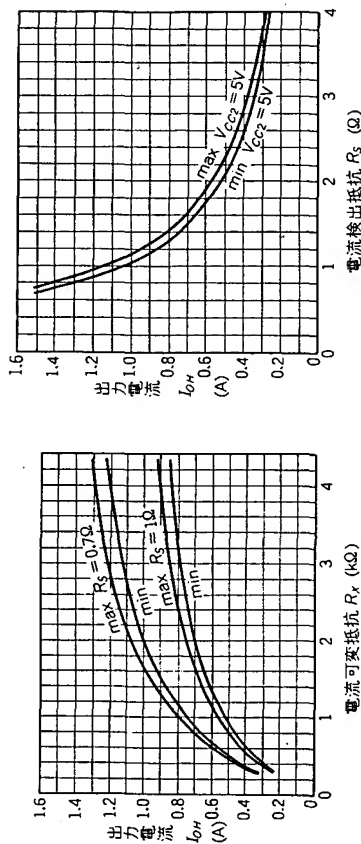
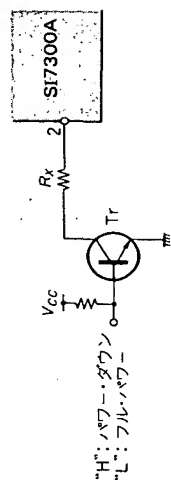
モータへの出力電流は、外部抵抗 R_X による調整のほかに、電流検出用抵抗値を選ぶことで制御することができます。図3.22(a)に、出力電流と電流可変抵抗 R_X との関係を示します。もちろん、電流検出用抵抗 R_S の値にも依存します。SI7300A の定格出力電流は約 600 mA ですが、 R_X の値としては $500\ \Omega \sim 1.5\ \text{k}\Omega$ になります。

図3.22(b)は、モータの出力電流 I_{OH} と、電流検出抵抗 R_S との特性です。モータを定格電流（ $\approx 600\text{ mA}$ ）以内に使用するのであれば、 R_S の値は 1.8Ω 以下になります。また、出力電流 I_{OH} は次の近似式で求めることができます。

$$I_{OH \text{ (max)}} \stackrel{+}{=} \frac{1}{R_s} (0.233 \cdot V_{CC2} - 0.026) A \dots\dots\dots (3-17)$$

$$I_{OH\ (min)} \doteq \frac{1}{R_S} \cdot (0.214 \cdot V_{CC2} - 0.021) \text{ A} \quad \dots\dots\dots (3-18)$$

ただし, V_{cc2} は補助電源電圧 ($\approx 5\text{ V}$)

図3.22⁽¹⁹⁾ SI7300A による駆動特性図3.23⁽¹⁹⁾ パワー・ダウンの制御回路

一般に、モータの回転時にフル・パワー電流を流す場合は R_X をオープンにして使用します。この時の R_S は、図3.22の特性表、あるいは(3-17), (3-18)式により求めて使用します。

ところで、 R_X が必要に応じて接続するようにすれば出力電流が制御できることとなります。したがって、モータの保持トルクを満足させながらパワー・ダウンを行うことができます。つまり、図3.23のように、外付けトランジスタ Tr を制御することで、2番ピンとグラウンドの間に R_X を接続したりすることが可能になります。

IC 外付け部品で特徴的なものとして、逆起電圧解消用の定電圧ダイオードがあります。これは、IC の特性表より $V_{CC} + 5V \sim 70V$ の範囲の指定があります。耐圧の高い定電圧ダイオードのほうが電流 OFF 時の時間が短くなりますが、定電圧ダイオードのパワー損失 P_{zd} も大きくなります。

この電流 OFF 時のコイルに流れる循環電流の立ち下がり時間 t_f や、パワー損失 P_{zd} の求め方は、3.2のドライブ・トランジスタ回路の設計の項に準じます。ただし、SI7300A に使用する定電圧ダイオードは、モータの各コイルに共通に用いていますので、 t_f の式が少し異なります。つまり、

1 相, 2 相励磁..... $t_f = \frac{1}{f}$ (3-19)

1-2 相励磁..... $t_f = \frac{2}{f}$ (3-20)

として、(3-13)式に代入して P_{zd} を求めるようにします。
相励磁切り替えトランジスタ ($Q_3 \sim Q_6$) はダーリントン接続になっています。このトランジスタが必要とするベース電流はモータのコイル電流によって違ってくるが、ベース

図3.24 相励磁信号のドライブ方法

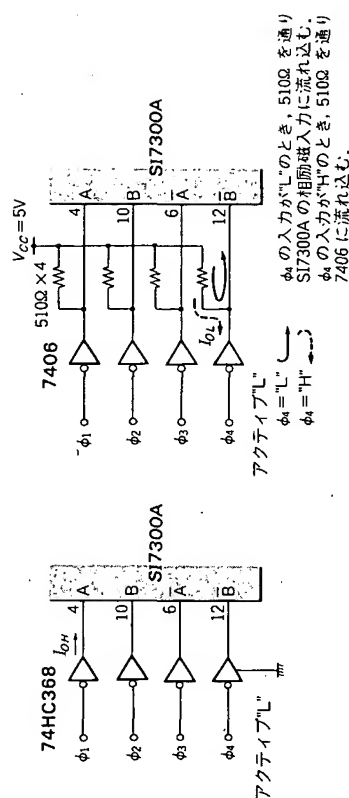
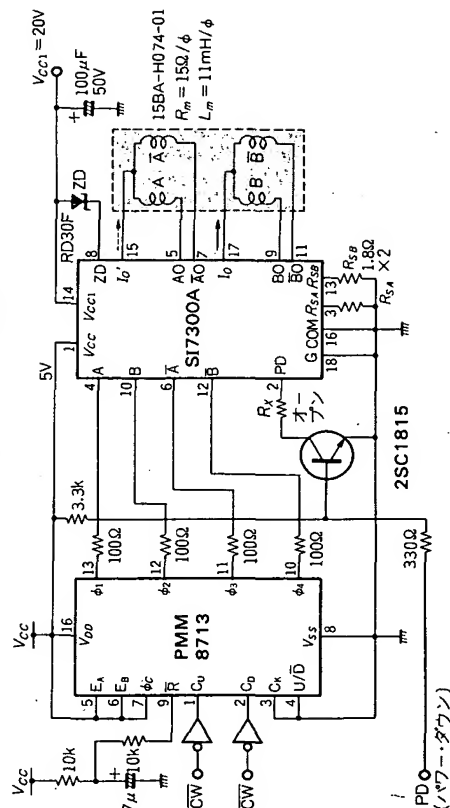
(a) $I_{OH} > 6mA$ のバッファ使用例(b) $I_{OH} > 10mA$ のオープン・コレクタ IC 使用例

図3.25 PMM8713 との接続例



電流として8mA程度流せるようにしておけば、 $I_o=1.5A$ 以下のコイル電流に対して十分満足できる値になります。

なお、このICの前段にくるドライブICは、“H”レベルで10mA以上流せるものであれば、電流制限抵抗を入れてドライブしたほうがよいでしょう。“H”レベルで必要な電流が取り出せなければ、TTLの7406などのオープン・コレクタ型ICを用いて、プルアップ抵抗を通してドライブ電流を確保します。ドライブ用ICの接続例を図3.24に示します。74HC368の I_{OH} は、推奨動作では4.5Vで6mAですが、実際には10mA程度は流すことができます。

ステッピング・モータの相励磁用IC PMM8713は出力電流が20mAまで取り出せますので、直接制限抵抗を通して接続することができます。図3.25にPMM8713との接続例を示します。

第4章

マイコンによるモータの基本制御技術

ステッピング・モータの駆動は、一部のものを除いて、デジタル信号だけで制御することができます。そして、デジタルの処理であれば、マイクロコンピュータで制御することが容易になります。近年、ステッピング・モータが多く使われるようになった一つの要因に、マイクロコンピュータ（以下マイコンという）との相性の良さがあると思われます。

ステッピング・モータの制御にマイコンを使うことのメリットは、

- (1) 制御をプログラムに行くことができる
- (2) 制御の変更のしやすさなど、自由度が高い
- (3) マイコンはモータの制御以外にも利用できる
- (4) 何らかの演算結果を、モータの制御にフィードバックすることができる
- (5) モータと組み合わせたシークエンシャル制御が容易にできる
- (6) 複数のモータを同時に制御することができる

などがあげられます。

そこで、この章では現在、制御用マイクロコンピュータの主流としてもっとも多く使用されている8ビット・マシン、Z80および6809を例にして、基本的なインターフェース方法と応用方法について紹介することにします。

4.1 インターフェース・ポートを作る方法

●どんなインターフェースが必要か

マイコンにステッピング・モータを接続しようという場合には、いわゆるI/Oポートと呼ばれる入出力のためのインターフェース回路を用意しなければなりません。そのためには、それぞれのマイコンに専用に用意されている周辺LSIを使うのが一般的です。

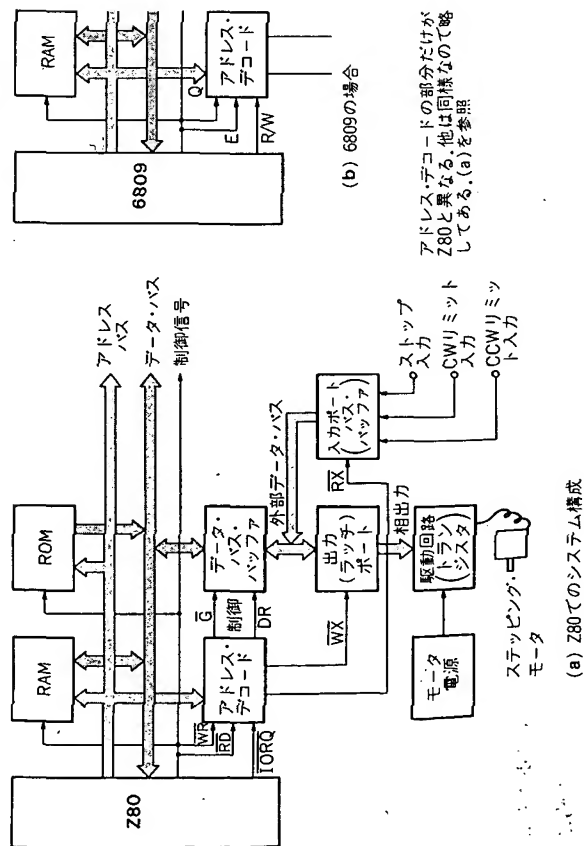
例えば、Z80系ではPIO（パラレル入出力）、あるいはPPI（パラレル周辺インターフェース）と呼ばれる8255A（本来はZ80系ではなく、8085Aの周辺LSI）、68系ではPIA（並列インターフェース・アダプタ）と呼ばれるMC6821などがあります。しかし、これらを汎用入出力ポートとして使用するには、周辺LSIのイニシャライズをソフトウェアで行わなければならない。これは意外と面倒なのです。

ところが、ステッピング・モータを制御するための相励磁や、モータの位置を知るリミット・スイッチの入力を読み込む程度のものであれば、専用I/Oポートを使う必要はありません。リミット・スイッチ入力を読み込みの汎用ロジックの3ステート・バッファ、相励磁駆動にラッチICを使用することで簡単に入出力ポートを構成することができます。

図4.1に、ステッピング・モータ・インターフェースを含むマイコン・システムの構成図を示します。

図4.1でも明らかのように、データ・バスに接続する3ステート・バッファやラッチICは、Z80でも6809でも変わりありません。変わるのはマイコンの出力するアドレス信号のデコード方法とタイミングの処理です。

図4.1 ステッピング・モータ・インターフェースをもつマイコン・システムの構成



Z80 とのインターフェース

Z80の場合、I/Oをアクセスする信号線として $\overline{\text{IORQ}}$ があります。この信号とリード($\overline{\text{RD}}$)信号、ライト($\overline{\text{WR}}$)信号、それにアドレス信号とでラッチおよび3ステート・バッファの制御を行います。この方法をI/O マップドI/O といいます。図4.2にZ80用のインターフェース回路例を示します。

なお、Z80は、I/O領域をメモリ領域の中に置くことも可能です。この方法をメモリ・マップドI/O といいます。この場合には、メモリ・アクセス信号($\overline{\text{MREQ}}$)を $\overline{\text{IORQ}}$ と入れ替えることで処理することができます。ただし、メモリ・マップドI/Oで制御を行う場合は、アドレスをフル・デコードしておかないと、ほかのメモリ・アクセス時に信号が干渉することもあるので注意が必要です。

● 6809 とのインターフェース

6809はZ80の $\overline{\text{RD}}$ 、 $\overline{\text{WR}}$ 信号が1本(R/W; R: "H", W: "L")になっています。また、I/O領域はなく、I/Oもメモリの一部として取り扱うメモリ・マップドI/Oです。そのためのメモリ・アクセスのタイミング信号としてEクロック、アドレス・バスのタイミング信号としてQクロックがあります。

これらの信号を用いてラッチのタイミングおよび、3ステート・バッファの制御を行うようにした例を図4.3に示します。

図4.2 Z80のI/O アドレス・デコード例

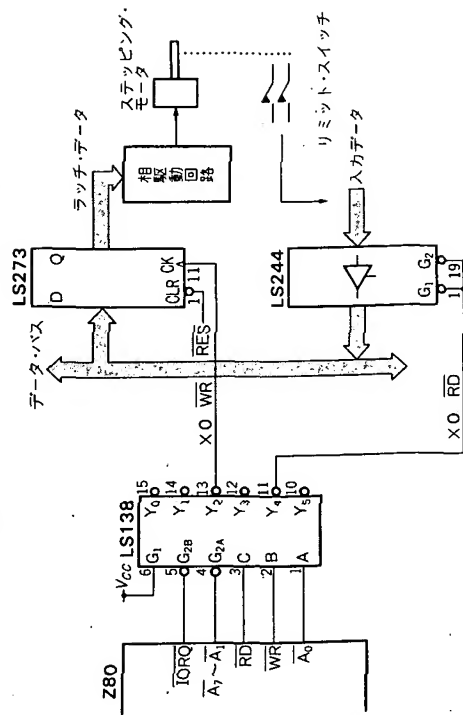
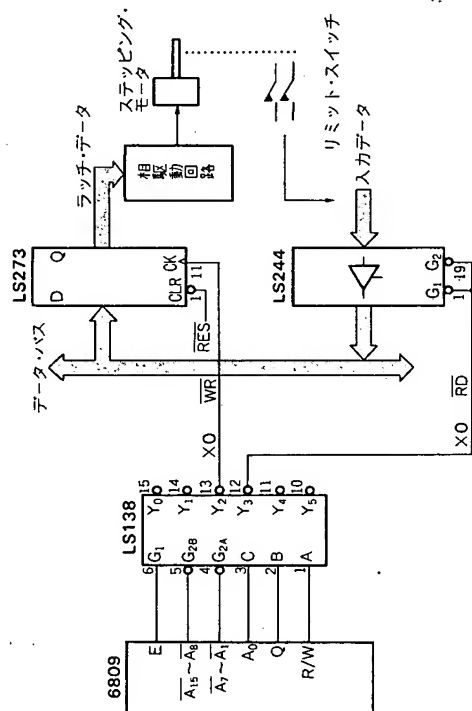


図4.3 6809のアドレス・デコード例



4.2 マイコンを利用したステップング・モータの制御

相励磁 IC PMM8713 とのインターフェース

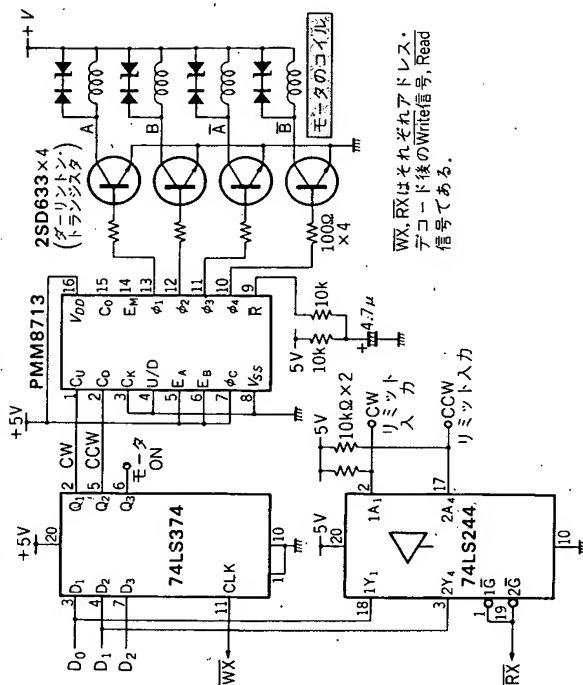
マイコンでステッピング・モータを駆動（励磁）する簡単な方法の一つに、第2章でも紹介した相励磁のための専用ICを利用することが考えられます。その中でも代表的なのがPMM8713ですが、このICとのインターフェース例を図4.4に示します。

マイコンの出力ポート (LS374) に PMIM8713 を接続するだけですから非常に簡単です。この場合には、マイコン自身をパルス発生器として使い (後述)、 D_0 と D_1 をそれぞれ CW (時計方向回転) パルス、CCW (反時計方向回転) パルスとして使い分けるようにしています。また、 D_2 はモータが ON 状態にあることを示すためのモニタ・ビット、あるいはその逆にモータが OFF していることを利用してパワー・ダウンなどを行う時に使用するものとができるものです。

とができるものです。

この回路では、マイコンより PMM8713 の C_{0i} 、あるいは C_0 に方向別パルス信号が入ってくると、そのパルスが入るごとに相出力 $\phi_i \sim \phi_n$ がシフトして、ステッピング・モータは入力パルスに應じた方向に回転することになります。したがって、この回路におけるモータの回転制御はすべてマイコン、すなわちソフトウェアにゆだねられることになります。

図4.4 マイコンとPMM8713とのインターフェース



\overline{WX} , \overline{RX} はそれぞれアドレス・デコード後のWrite信号, Read信号である。

●マイコンによるパルス発生の方

ステッピング・モータの相出力制御をPMM 8713などの専用ICにまかせるようにすれば、マイコンはただモータを回転させるためのパルス発生器としての機能をもてばよいこととなります。そこで、まずマイコンによるパルス発生の方法について考えてみることにしましょう。

通常、マイコンのクロック源には水晶発振子を使用しているために、そこからは安定で精度の高いパルスが得られます。そこで、基本的な考え方は、命令のサイクル数を利用するタイマと、出力ポート（この場合は出力ラッチ LS374 の D_0 、 D_1 ビット）を ON/OFF するルーチンから成ります。まず、たんにパルスを出すだけのプログラムを考えてみます。

▲Z80の場合

| | | | |
|----|-----|------|----|
| LD | B | 01 | 7 |
| Z | OUT | (P0) | A |
| | XOR | B | 4 |
| | JP | Z | 10 |

▲6809の場合

| | サイクル数↓ |
|-------|----------|
| Z STA | <P0 * 4 |
| EORA | \$01 * 2 |
| BRA | Z * 3 |

CPU が Z80 の場合は、クロック $\phi = 4 \text{ MHz}$ とすると、1 サイクルは $0.25 \mu\text{s}$ です。したがって、このプログラムを実行すると、約 80 kHz (pps) のパルスが得られます。

6809 の場合は水晶発振子を 4 MHz とすると、クロックの 1 サイクルは $1 \mu\text{s}$ となり、約 55 kHz (pps) のパルスが得られることになります。

しかし、このままでは周波数は高すぎるし、パルスの停止を行うこともできません。そこで、次には任意のパルス周波数を得る方法を考えてみましょう。

任意の周波数が得られ、一方向のみの回転で、あるパルス数だけを出すためのサブルーチンをリスト 4.1 に示します。この方法は、パルスを出した後にタイマを入れる方法で、減算タイマ用のレジスタの値を大きくすると周波数は低くなります。しかし、一定間隔のパルスであるため、実際に使う場合は、このパルス周波数がモータの自起動周波数範囲内になるように制限されます。そのため使用範囲は限られます。

リスト 4.1 簡単なソフトウェア・タイマ・プログラム

```
; HL = パルス数 (0 ~ 65535)      * X = パルス数 (1 ~ 65535)
; IX = タイマ                    * Y = タイマ
```

Z80

*

6809

```
BEGIN: LD      DE, -1
LOOP:  PUSH    IX
      OR      01H
      OUT     (POUT), A; 15
      AND     0FEH
      OUT     (POUT), A; 11
      OUT     (POUT), A; 11
      JP      C, DELAY; 15
      POP     IX
      ADD     HL, DE; 11
      JP      C, LOOP; 10
      RET

DELAY: JP      C, DELAY; 10
      POP     IX
      ADD     HL, DE; 11
      JP      C, LOOP; 10
      RET
```

$$\text{周波数 (pps)} = \frac{10^6}{0.25(111 + 25 \cdot X)}$$

2.4pps ~ 36036pps

(a) Z80 の場合

$$\text{周波数 (pps)} = \frac{10^6}{34 + 8X}$$

1.9pps ~ 23809pps

(b) 6809 の場合

実用的なパルス発生プログラム

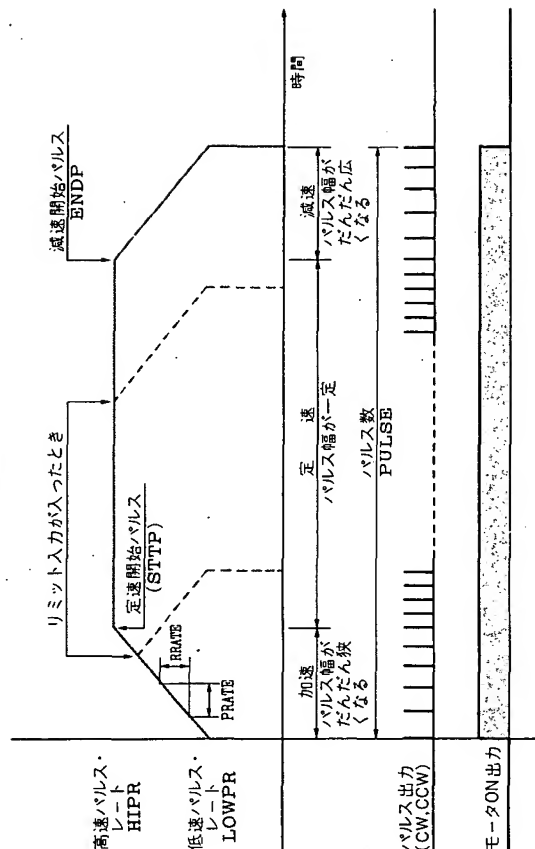
モータを実際に動作させる場合は、早く移動したいとかパルス数が多過ぎるとかいうことが多くあります。あるいは調整ごとにパルスを変えることがあったり、フォト・センサによる検出地点でモータを停止させたい、などということが発生します。さらに実際には、モータの加減速動作 (スロー・アップ/スロー・ダウン) はどうしても必要となり、それを認識、制御するためのフォト・センサ入力への対応も必要となります。

これらを考慮した本格的なパルス発生器のタイムチャートが図 4.5 です。また、プログラム・フローチャートが図 4.6 です。このプログラムでは加速、定速、減速時の周波数が同じ式になるように無意味な命令 (タイマ) を入れています。

また、このプログラムはサブルーチン化されており、入力パラメータをセットして BEGIN をコールすると、パラメータに沿ったパルスを発生します。リスト 4.2 とリスト 4.3 に Z80 および 6809 によるプログラム・リストの実例を示します。

このプログラムにおいて、入力パラメータの LOWPR は、開始時あるいは停止直前のパルス・レートです。また HIPR は定速時のパルス・レートです。この値でスピードが決まります。

図 4.5 加減速動作のタイムチャート



リスト4.2 (つづき)

| | | | | | |
|------|----------|-------------|---|----------------------------|--|
| 1020 | 2A 8000" | LD | HL, (LOWPR) | 116 | |
| | | | 11X=LOWPR, A=0, HL=(LOWPR), HL=STTP+1, BC'= (PULSE) | | |
| 1023 | 08 | EX | AF, AF' | | |
| 1024 | CD 111E | CALL | PONOFF | | |
| | | LD | A, B | 14 | |
| 1027 | 78 | CP | (HL) | 17 | |
| 1028 | BE 23 | JR | NZ, UP2 | 112, 7:PULSE'H - STTP'H ? | |
| 1029 | 20 | LD | A, C | 14 | |
| 102B | 79 | DEC | HL | 16 | |
| 102C | 28 | CP | (HL) | 17 | |
| 102D | BE 3C | JR | Z, CONST | 112, 7:PULSE'L - STTP'L ? | |
| 102E | 20 | INC | HL | 16 | |
| 1030 | 23 | EXX | | 14 | |
| 1031 | D9 | LD | A, (MODDIR) | 113X | |
| 1032 | 3A 8008" | LD | 1 | 17X | |
| 1035 | E6 01 | AND | A | 4X | |
| 1037 | 3C | INC | A | 4X | |
| 1038 | 47 | LD | B, A | 11X | |
| 1039 | DB 81 | IN | A, (LIMIT) | 11X | |
| 103B | A0 | AND | B | 14X | |
| 103C | 28 6E | JR | Z, LMTON1 | 112, 7X LIMIT ON ? | |
| 103E | 08 | EX | AF, AF' | 14 | |
| 103F | 3C | INC | A | 14 | |
| 1040 | DD BE 03 | CP | (1X+3) | 113:P RATE | |
| 1043 | 20 0E | JR | NZ, UP4 | 112, 7 | |
| 1045 | AF | XOR | A | 14: A=0, CY=0 | |
| 1046 | ED 52 | LD | DE, (RATE) | 120: D=0 | |
| 104A | HL, DE | SSC | HL, DE | 115: HL=LOWPR - RRATE | |
| 104C | 18 D5 | JR | UP | 112 | |
| | | | 113X DELAY ROUTINE *** | | |
| 104E | 3A 8008" | LD | A, (MODDIR) | 113 | |
| 1051 | 18 DE | JR | UP1 | 112 | |
| 1053 | 18 00 | JR | UP5 | 112 | |
| 1055 | 18 00 | JR | UP6 | 112 | |
| 1057 | 18 00 | JR | UP7 | 112 | |
| 1059 | C3 1023 | JP | UP | 110 | |
| 105C | FD 34 00 | MOVLMT: INC | (1Y) | 123 | |
| 105F | C3 1062 | JP | MOVLMT | 110 | |
| 1062 | C3 1056 | JP | LMTCHK | 110 | |
| 1065 | 00 | JP | LMTCHK | 110 | |
| 1066 | C3 1069 | JP | LMTCHK | 110 | |
| 1069 | C3 1096 | JP | LMTCHK | 110 | |
| 106C | FD 34 00 | INC | (1Y) | 123 | |
| 106F | FD 34 00 | INC | (1Y) | 123 | |
| 1072 | FD 34 00 | INC | (1Y) | 123 | |
| 1075 | FD 34 00 | INC | (1Y) | 123 | |
| 1078 | FD BE 00 | CP | (1Y) | 119 | |
| 107B | 21 8007" | LD | HL, ENDP+1 | 110 | |
| 107E | 09 | EXX | | 14 | |
| 107F | 2A 8002" | LD | HL, (H1PR) | 116 | |
| | | | 117: PULSE OFF/ON, TIMER, PULSE-1 *** 173+23X | | |
| 1082 | CD 111E | CALL | PONOFF | | |
| | | LD | A, (MODDIR) | 117 | |
| 1085 | 3A 8008" | LD | O2H | 113 | |
| 1088 | E6 02 | AND | A | 17 | |
| 108A | 20 D0 | JR | NZ, MOVLMT | 112, 7: TO LIMIT ? | |
| 108C | 78 | LD | A, B | 14 | |
| 108D | BE | CP | (HL) | 17 | |
| 108E | 20 D5 | JR | NZ, LMTCHK | 112, 7: PULSE'H - ENDP'H ? | |
| 1090 | 79 | LD | A, C | 14 | |
| 1091 | 28 | DEC | HL | 16 | |
| 1092 | BE | CP | (HL) | 17 | |

リスト4.2 (つづき)

| | | | | | |
|------|-------------|-------------|---|--|--|
| 1093 | 28 5B | JR | INC | | |
| 1095 | 23 | LMTCHK: EXX | | | |
| 1096 | 03 | LD | A, (MODDIR) | | |
| 1097 | 3A 8008" | LD | 1 | | |
| 109A | E6 01 | AND | A | | |
| 109C | 3C | INC | A | | |
| 109D | 47 | LD | B, A | | |
| 109E | DB 81 | IN | A, (LIMIT) | | |
| 10A0 | 28 17 | AND | B | | |
| 10A1 | FD 34 00 | JR | Z, LMTON | | |
| 10A3 | FD 34 00 | INC | (1Y) | | |
| 10A6 | FD 34 00 | INC | (1Y) | | |
| 10A9 | 00 | NOP | | | |
| 10AA | 18 D6 | JR | FLAT | | |
| | | | 112 | | |
| 10AC | D9 | LMTON1: EXX | | | |
| 10AD | 2A 8004" | LD | HL, (PULSE) | | |
| 10B0 | 59 | LD | E, C | | |
| 10B1 | 50 | LD | D, B | | |
| 10B2 | 4F | XOR | A | | |
| 10B3 | ED 52 | SSC | HL, DE | | |
| 10B5 | 40 | LD | C, L | | |
| 10B6 | 44 | LD | B, H | | |
| 10B7 | D9 | EXX | | | |
| 10B8 | 18 46 | JR | DOWN | | |
| 10BA | D9 | EXX | | | |
| 10BB | ED 4B 8006" | LD | BC, (ENDP) | | |
| 10B8 | D9 | EXX | | | |
| 10C0 | C3 1100 | CP | DOWN | | |
| 10C3 | FD BE 00 | JP | (1Y) | | |
| 10C6 | FD BE 00 | JP | (1Y) | | |
| 10C9 | C3 10CC | JP | SLOW2 | | |
| 10CC | FD 34 00 | INC | (1Y) | | |
| 10CF | FD 34 00 | INC | (1Y) | | |
| 10D2 | FD 34 00 | INC | (1Y) | | |
| 10D5 | C3 1101 | JP | SLOW | | |
| 10D8 | FD 34 00 | INC | (1Y) | | |
| 10DE | FD 34 00 | INC | (1Y) | | |
| 10E1 | FD 34 00 | INC | (1Y) | | |
| 10E4 | FD 34 00 | INC | (1Y) | | |
| 10E7 | FD 34 00 | INC | (1Y) | | |
| 10EA | C3 10ED | JP | STOP1 | | |
| 10ED | C3 111A | JP | STOP | | |
| 10F0 | FD 34 00 | INC | (1Y) | | |
| 10F3 | FD 34 00 | INC | (1Y) | | |
| 10F6 | FD 34 00 | INC | (1Y) | | |
| 10F9 | FD 34 00 | INC | (1Y) | | |
| 10FC | FD 34 00 | INC | (1Y) | | |
| 10FF | D8 | EXX | | | |
| 1100 | AF | XOR | A | | |
| | | | 384+23X | | |
| 1101 | 08 | LD | AF, AF' | | |
| 1102 | CD 111E | CALL | PONOFF | | |
| | | | 117: PULSE OFF/ON, TIMER, PULSE-1 *** 173+23X | | |
| 1105 | 78 | LD | A, B | | |
| 1106 | 81 | OR | C | | |
| 1107 | D9 | EXX | | | |
| 1108 | 28 CE | JR | Z, STOP0 | | |
| 110A | 08 | EX | AF, AF' | | |
| 110B | 3C | INC | A | | |
| 110C | DD BE 03 | CP | (1Y+9) | | |
| 110F | 20 B2 | JR | NZ, SLOW0 | | |
| 1111 | AF | XOR | A | | |
| 1112 | ED 5B 800A" | LD | DE, (RRATE) | | |

リスト4.3 (つづき)

| | | | | | | |
|------|-----------|------|------|------|-----------------|----|
| E097 | 108C 0000 | E0A1 | 0111 | CMPT | #0 | 15 |
| E098 | 27 11 | E0A2 | 0112 | BEQ | STOP | 13 |
| E099 | 4C | E0A3 | 0113 | INCA | | 12 |
| E09A | 91 09 | E0A4 | 0114 | CMPT | <PRATE | 14 |
| E09B | 26 31 | E0A5 | 0115 | BNE | SLOW | 13 |
| E09C | 4F | E0A6 | 0116 | CLRA | | 12 |
| E09D | D6 0A | E0A7 | 0117 | LDR | <RATE | 14 |
| E09E | 30 85 | E0A8 | 0118 | LEAX | B,X | 15 |
| E09F | 34 30 | E0A9 | 0119 | PSHS | X,Y | 13 |
| E0A0 | 35 30 | E0AA | 0120 | PULS | X,Y | 13 |
| E0A1 | 16 FFE7 | E0AB | 0121 | LEBA | SLOW | 15 |
| E0A2 | 34 7F | E0AC | 0122 | PSHS | CC:A,B,DP,X,Y,U | 15 |
| E0A3 | 35 7F | E0AD | 0123 | PULS | CC:A,B,DP,X,Y,U | 15 |
| E0A4 | 34 02 | E0AE | 0124 | PSHS | A | 16 |
| E0A5 | 35 02 | E0AF | 0125 | PULS | A | 16 |
| E0A6 | 5F | E0B0 | 0126 | CLRB | | 12 |
| E0A7 | F7 A000 | E0B1 | 0127 | STB | POUT | 15 |
| E0A8 | 39 | E0B2 | 0128 | RTS | | 15 |
| | | E0B3 | 0129 | .END | | 15 |

TABLE SYMBOL TABLE *****

| | | | | | |
|--------|------|--------|------|--------|------|
| REGIN | E000 | CONST | E057 | DELAY | E03C |
| ENDP | E00F | FLAT | E060 | HPR | 0002 |
| LMTON1 | E07D | LOWPR | 0000 | MODDIR | 0008 |
| PRATE | 0005 | PULSE | 0004 | RAN | 0000 |
| SLOW | E035 | SLOW | E032 | SPEED | E04E |
| UP1 | E03D | WORK | 000E | | |
| DOWN | E030 | DOWN | E080 | DOWN | E094 |
| LIMIT | E001 | LIMIT | E08D | LMTON | E088 |
| POULMT | E039 | PONOFF | E03F | POUT | A000 |
| POM | E000 | PRATE | 000A | SAVEP | 0010 |
| STOP | E04E | STIP | 000C | UP | E00F |

リスト4.3 (つづき)

| | | | | | | |
|------|---------|------|------|--------|---|---------------------|
| E02F | 35 02 | E056 | 0056 | PULS | A | #5 |
| E031 | 20 DC | E057 | 0057 | UP | CC:A,B,DP,X,Y,U | 15 |
| E033 | 34 7F | E058 | 0058 | PSHS | CC:A,B,DP,X,Y,U | 15 |
| E035 | 35 7F | E059 | 0059 | PULS | SLOW | 15 |
| E037 | 20 5C | E05A | 0060 | BRA | DELAY | 15 |
| E039 | 16 0000 | E05B | 0061 | LEBA | LMTCHK | 15 |
| E03C | 16 002E | E05D | 0062 | LEBA | SUBROUTINE (PULSE OFF/ON, TIMER, PULSE-1) | 15 |
| | | E05E | 0063 | ***** | 40+8*X | 15 |
| E03F | 06 04 | E05F | 0064 | PONOFF | LDR | #04 |
| E041 | E7 C4 | E060 | 0065 | STB | O,U | 41:PULSE OFF (POUT) |
| E043 | 06 08 | E061 | 0066 | LDR | <MODIR | 14 |
| E045 | C4 01 | E062 | 0067 | ANDE | #1 | 14 |
| E047 | 5C | E063 | 0068 | INCB | | 12 |
| E048 | C4 04 | E064 | 0069 | OFB | #04 | 12:MOTOR ON |
| E04A | E7 C4 | E065 | 0070 | STB | O,U | 14:PULSE ON (POUT) |
| E04C | 9F 0E | E066 | 0071 | STX | <WORK | 15 |
| E04E | 30 1F | E067 | 0072 | LEAX | -1,X | 15 |
| E050 | 26 FC | E068 | 0073 | BNE | SPEED | 13:TIMER |
| E052 | 3E 0E | E069 | 0074 | LDR | <WORK | 15 |
| E054 | 31 3F | E06A | 0075 | LEAX | -1,Y | 15:PULSE-1 |
| E056 | 39 | E06B | 0076 | RTS | | 15 |
| E057 | 3E 02 | E06C | 0077 | LDR | <HPR | 15 |
| E059 | 34 7F | E06D | 0078 | PSHS | CC:A,B,DP,X,Y,U | 15 |
| E05B | 35 7F | E06E | 0079 | PULS | CC:A,B,DP,X,Y,U | 15 |
| E05D | 16 0000 | E06F | 0080 | LEBA | FLAT | 15 |
| E060 | 8D 0D | E070 | 0081 | BSR | 38+8*X | 15 |
| E062 | 96 08 | E071 | 0082 | LDA | PONOFF | 17:47+8*X |
| E064 | 84 02 | E072 | 0083 | ANDA | <MODIR | 14 |
| E066 | 26 01 | E073 | 0084 | BNE | #2 | 12 |
| E068 | 108C 06 | E074 | 0085 | CMPT | MOVLMT | 13 |
| E06A | 27 23 | E075 | 0086 | BEQ | <ENDP | 17 |
| E06C | C4 01 | E076 | 0087 | LDR | DOWN | 13 |
| E06E | D6 06 | E077 | 0088 | ANDE | <MODIR | 14 |
| E06F | C4 01 | E078 | 0089 | INCB | #1 | 12 |
| E071 | 5C A001 | E079 | 0090 | PSHS | LIMIT | 12 |
| E073 | 27 11 | E07A | 0091 | BEQ | LMTON | 15 |
| E075 | 34 10 | E07B | 0092 | PSHS | X | 13 |
| E077 | 35 10 | E07C | 0093 | PULS | X | 17 |
| E079 | 35 10 | E07D | 0094 | BRA | FLAT | 13 |
| E07B | 20 E3 | E07E | 0095 | STY | <SAVEP | 16 |
| E07D | 108F 10 | E07F | 0096 | LDD | <PULSE | 15 |
| E07F | DC 04 | E080 | 0097 | SUBO | <SAVEP | 16 |
| E082 | 93 10 | E081 | 0098 | TFR | D,Y | 16 |
| E084 | 1F 02 | E082 | 0099 | BRA | DOWN1 | 13 |
| E086 | 20 0C | E083 | 0100 | LDR | <ENDP | 16 |
| E088 | 108E 06 | E084 | 0101 | BRA | DOWN | 13 |
| E08A | 20 00 | E085 | 0102 | LEBA | DOWN1 | 15 |
| E08C | 16 0004 | E086 | 0103 | PSHS | CC:A,B,DP,X,Y,U | 15 |
| E08E | 34 7F | E087 | 0104 | PULS | CC:A,B,DP,X,Y,U | 15 |
| E090 | 35 7F | E088 | 0105 | CLRA | 38+8*X | 12 |
| E092 | 4F | E089 | 0106 | BSR | PONOFF | 17:47+8*X |
| E094 | | E08A | 0107 | | | |
| E096 | | E08B | 0108 | | | |
| E098 | | E08C | 0109 | | | |
| E09A | | E08D | 0110 | | | |
| E09C | | E08E | | | | |
| E09E | | E08F | | | | |
| E09F | | E090 | | | | |
| E0A0 | | E091 | | | | |
| E0A1 | | E092 | | | | |
| E0A2 | | E093 | | | | |
| E0A3 | | E094 | | | | |
| E0A4 | | E095 | | | | |
| E0A5 | | E096 | | | | |
| E0A6 | | E097 | | | | |
| E0A7 | | E098 | | | | |
| E0A8 | | E099 | | | | |
| E0A9 | | E09A | | | | |
| E0AA | | E09B | | | | |
| E0AB | | E09C | | | | |
| E0AC | | E09D | | | | |
| E0AD | | E09E | | | | |
| E0AE | | E09F | | | | |
| E0AF | | E0A0 | | | | |
| E0B0 | | E0A1 | | | | |
| E0B1 | | E0A2 | | | | |
| E0B2 | | E0A3 | | | | |
| E0B3 | | E0A4 | | | | |
| E0B4 | | E0A5 | | | | |
| E0B5 | | E0A6 | | | | |
| E0B6 | | E0A7 | | | | |
| E0B7 | | E0A8 | | | | |
| E0B8 | | E0A9 | | | | |
| E0B9 | | E0AA | | | | |
| E0BA | | E0AB | | | | |
| E0BB | | E0AC | | | | |
| E0BC | | E0AD | | | | |
| E0BD | | E0AE | | | | |
| E0BE | | E0AF | | | | |
| E0BF | | E0B0 | | | | |
| E0C0 | | E0B1 | | | | |
| E0C1 | | E0B2 | | | | |
| E0C2 | | E0B3 | | | | |
| E0C3 | | E0B4 | | | | |
| E0C4 | | E0B5 | | | | |
| E0C5 | | E0B6 | | | | |
| E0C6 | | E0B7 | | | | |
| E0C7 | | E0B8 | | | | |
| E0C8 | | E0B9 | | | | |
| E0C9 | | E0BA | | | | |
| E0CA | | E0BB | | | | |
| E0CB | | E0BC | | | | |
| E0CC | | E0BD | | | | |
| E0CD | | E0BE | | | | |
| E0CE | | E0BF | | | | |
| E0CF | | E0C0 | | | | |
| E0D0 | | E0C1 | | | | |
| E0D1 | | E0C2 | | | | |
| E0D2 | | E0C3 | | | | |
| E0D3 | | E0C4 | | | | |
| E0D4 | | E0C5 | | | | |
| E0D5 | | E0C6 | | | | |
| E0D6 | | E0C7 | | | | |
| E0D7 | | E0C8 | | | | |
| E0D8 | | E0C9 | | | | |
| E0D9 | | E0CA | | | | |
| E0DA | | E0CB | | | | |
| E0DB | | E0CC | | | | |
| E0DC | | E0CD | | | | |
| E0DD | | E0CE | | | | |
| E0DE | | E0CF | | | | |
| E0DF | | E0D0 | | | | |
| E0E0 | | E0D1 | | | | |
| E0E1 | | E0D2 | | | | |
| E0E2 | | E0D3 | | | | |
| E0E3 | | E0D4 | | | | |
| E0E4 | | E0D5 | | | | |
| E0E5 | | E0D6 | | | | |
| E0E6 | | E0D7 | | | | |
| E0E7 | | E0D8 | | | | |
| E0E8 | | E0D9 | | | | |
| E0E9 | | E0DA | | | | |
| E0EA | | E0DB | | | | |
| E0EB | | E0DC | | | | |
| E0EC | | E0DD | | | | |
| E0ED | | E0DE | | | | |
| E0EE | | E0DF | | | | |
| E0EF | | E0E0 | | | | |
| E0F0 | | E0E1 | | | | |
| E0F1 | | E0E2 | | | | |
| E0F2 | | E0E3 | | | | |
| E0F3 | | E0E4 | | | | |
| E0F4 | | E0E5 | | | | |
| E0F5 | | E0E6 | | | | |
| E0F6 | | E0E7 | | | | |
| E0F7 | | E0E8 | | | | |
| E0F8 | | E0E9 | | | | |
| E0F9 | | E0EA | | | | |
| E0FA | | E0EB | | | | |
| E0FB | | E0EC | | | | |
| E0FC | | E0ED | | | | |
| E0FD | | E0EE | | | | |
| E0FE | | E0EF | | | | |
| E0FF | | E0F0 | | | | |

相励磁機能を加えたパルス発生プログラム

PM8713などの専用ICを使うとモータの相励磁回路はIC 1個となり、かなり簡単になるのですが、汎用ICと違って比較的高価だという欠点があります。また、使用するICによって励磁するモードが異なりますので、モータの種類によってIC、ひいてはプリント基板を変更しなければならぬという難点があります。

そこで、ここでは専用 IC は使わずに、相励磁までマイコン側で行ってしまう方法について紹介しましょう。基本的には PMM8713 などのもっている機能をソフトウェアに置き換えるわけです。

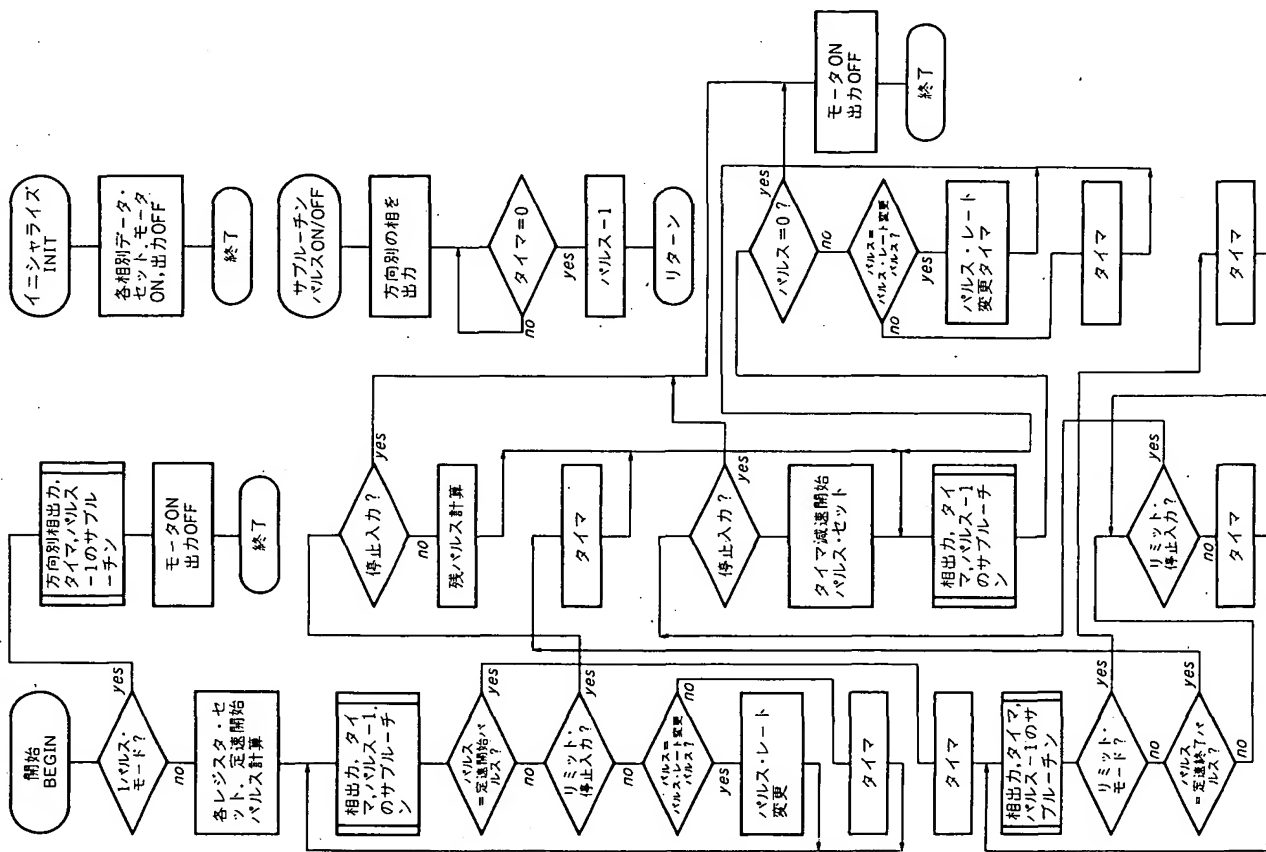
追加機能としては3相モータ(2相, 1-2相励磁), 5相モータ(2相, 1-2相励磁), 4相モータ(2相, 1-2相励磁)のいずれかのモードが選択できます。またシングルのバルス・

表4.1 パルス発生プログラムによる計算順序と例

| CPU | Z80A (4MHz) | | 6809 (4MHz) | |
|-----------------|-----------------------------|--------|-----------------------------|-----------|
| プログラム | リスト 4-2 * | | リスト 4-3 * | |
| 周波数(pps) | 10 ⁶ | | 10 ⁶ | |
| X = HIPR, LOWPR | 0.25(364 + 23(X)) | | 98 + 8(X) | |
| パルス・レート | (10 ⁶ /pps) - 91 | | (10 ⁶ /pps) - 98 | |
| HIPR, LOWPR | 5.75 | | 8 | |
| LOWPR(500pps) | 332(500pps) | | 238(499, 5pps) | |
| HIPR(2000pps) | 71(2003pps) | | 50(2008pps) | |
| ENDP | 261 | 130 87 | 260 130 87 | 188 94 62 |
| PRATE | 1 | 1 1 | 1 1 1 | 1 1 1 |
| RRATE | 1 | 2 3 | 1 2 3 | 1 2 3 |
| PULSE | 2000 | | 2000 | |
| 周波数範囲 | 2.6pps ~ 10.989kpps | | 1.9pps ~ 9.434kpps | |

1. リスト4-2とリスト4-3はパルス発生機能のみ。
2. 定速時と開始(停止)時の周波数(pps)を決める。
3. 周波数(pps)からLOWPR, HIPRを計算する。
4. HIPRとLOWPRの差を計算し、ENDPにする。
5. HIPRとLOWPRは整数のため、再度、周波数(pps)を計算する。
6. PRATE, RRATEは通常1にする。急に加減速する時はRRATEを増やし(N倍)。
7. PULSEはENDPの2倍より大きくする。
3で求めたENDP(1/N)を減らす。

図4.7 相励磁を加えたパルス発生プログラムのフローチャート



リスト4.4 (つづき)

| | | | | | |
|------|----|------|-----|-----------|-----|
| 106C | 3C | 1047 | INC | A | 14F |
| 106D | 47 | 1048 | OR | 04H | 17F |
| 106E | 48 | 1049 | LD | B,A | 14F |
| 106F | 49 | 1050 | LD | A,(LIMIT) | 14F |
| 1070 | 4A | 1051 | LD | B | 14F |
| 1071 | 4B | 1052 | AND | B | 14F |
| 1072 | 4C | 1053 | XOR | B | 14F |
| 1073 | 4D | 1054 | XOR | B | 14F |
| 1074 | 4E | 1055 | XOR | B | 14F |
| 1075 | 4F | 1056 | XOR | B | 14F |
| 1076 | 50 | 1057 | XOR | B | 14F |
| 1077 | 51 | 1058 | XOR | B | 14F |
| 1078 | 52 | 1059 | XOR | B | 14F |
| 1079 | 53 | 1060 | XOR | B | 14F |
| 1080 | 54 | 1061 | XOR | B | 14F |
| 1081 | 55 | 1062 | XOR | B | 14F |
| 1082 | 56 | 1063 | XOR | B | 14F |
| 1083 | 57 | 1064 | XOR | B | 14F |
| 1084 | 58 | 1065 | XOR | B | 14F |
| 1085 | 59 | 1066 | XOR | B | 14F |
| 1086 | 5A | 1067 | XOR | B | 14F |
| 1087 | 5B | 1068 | XOR | B | 14F |
| 1088 | 5C | 1069 | XOR | B | 14F |
| 1089 | 5D | 1070 | XOR | B | 14F |
| 1090 | 5E | 1071 | XOR | B | 14F |
| 1091 | 5F | 1072 | XOR | B | 14F |
| 1092 | 60 | 1073 | XOR | B | 14F |
| 1093 | 61 | 1074 | XOR | B | 14F |
| 1094 | 62 | 1075 | XOR | B | 14F |
| 1095 | 63 | 1076 | XOR | B | 14F |
| 1096 | 64 | 1077 | XOR | B | 14F |
| 1097 | 65 | 1078 | XOR | B | 14F |
| 1098 | 66 | 1079 | XOR | B | 14F |
| 1099 | 67 | 1080 | XOR | B | 14F |
| 1100 | 68 | 1081 | XOR | B | 14F |
| 1101 | 69 | 1082 | XOR | B | 14F |
| 1102 | 6A | 1083 | XOR | B | 14F |
| 1103 | 6B | 1084 | XOR | B | 14F |
| 1104 | 6C | 1085 | XOR | B | 14F |
| 1105 | 6D | 1086 | XOR | B | 14F |
| 1106 | 6E | 1087 | XOR | B | 14F |
| 1107 | 6F | 1088 | XOR | B | 14F |
| 1108 | 60 | 1089 | XOR | B | 14F |
| 1109 | 61 | 1090 | XOR | B | 14F |
| 1110 | 62 | 1091 | XOR | B | 14F |
| 1111 | 63 | 1092 | XOR | B | 14F |
| 1112 | 64 | 1093 | XOR | B | 14F |
| 1113 | 65 | 1094 | XOR | B | 14F |
| 1114 | 66 | 1095 | XOR | B | 14F |
| 1115 | 67 | 1096 | XOR | B | 14F |
| 1116 | 68 | 1097 | XOR | B | 14F |
| 1117 | 69 | 1098 | XOR | B | 14F |
| 1118 | 6A | 1099 | XOR | B | 14F |
| 1119 | 6B | 1100 | XOR | B | 14F |
| 1120 | 6C | 1101 | XOR | B | 14F |
| 1121 | 6D | 1102 | XOR | B | 14F |
| 1122 | 6E | 1103 | XOR | B | 14F |
| 1123 | 6F | 1104 | XOR | B | 14F |
| 1124 | 60 | 1105 | XOR | B | 14F |
| 1125 | 61 | 1106 | XOR | B | 14F |
| 1126 | 62 | 1107 | XOR | B | 14F |
| 1127 | 63 | 1108 | XOR | B | 14F |
| 1128 | 64 | 1109 | XOR | B | 14F |
| 1129 | 65 | 1110 | XOR | B | 14F |
| 1130 | 66 | 1111 | XOR | B | 14F |
| 1131 | 67 | 1112 | XOR | B | 14F |
| 1132 | 68 | 1113 | XOR | B | 14F |
| 1133 | 69 | 1114 | XOR | B | 14F |
| 1134 | 6A | 1115 | XOR | B | 14F |
| 1135 | 6B | 1116 | XOR | B | 14F |
| 1136 | 6C | 1117 | XOR | B | 14F |
| 1137 | 6D | 1118 | XOR | B | 14F |
| 1138 | 6E | 1119 | XOR | B | 14F |
| 1139 | 6F | 1120 | XOR | B | 14F |
| 1140 | 60 | 1121 | XOR | B | 14F |
| 1141 | 61 | 1122 | XOR | B | 14F |
| 1142 | 62 | 1123 | XOR | B | 14F |
| 1143 | 63 | 1124 | XOR | B | 14F |
| 1144 | 64 | 1125 | XOR | B | 14F |
| 1145 | 65 | 1126 | XOR | B | 14F |
| 1146 | 66 | 1127 | XOR | B | 14F |
| 1147 | 67 | 1128 | XOR | B | 14F |
| 1148 | 68 | 1129 | XOR | B | 14F |
| 1149 | 69 | 1130 | XOR | B | 14F |
| 1150 | 6A | 1131 | XOR | B | 14F |
| 1151 | 6B | 1132 | XOR | B | 14F |
| 1152 | 6C | 1133 | XOR | B | 14F |
| 1153 | 6D | 1134 | XOR | B | 14F |
| 1154 | 6E | 1135 | XOR | B | 14F |
| 1155 | 6F | 1136 | XOR | B | 14F |
| 1156 | 60 | 1137 | XOR | B | 14F |
| 1157 | 61 | 1138 | XOR | B | 14F |
| 1158 | 62 | 1139 | XOR | B | 14F |
| 1159 | 63 | 1140 | XOR | B | 14F |
| 1160 | 64 | 1141 | XOR | B | 14F |
| 1161 | 65 | 1142 | XOR | B | 14F |
| 1162 | 66 | 1143 | XOR | B | 14F |
| 1163 | 67 | 1144 | XOR | B | 14F |
| 1164 | 68 | 1145 | XOR | B | 14F |
| 1165 | 69 | 1146 | XOR | B | 14F |
| 1166 | 6A | 1147 | XOR | B | 14F |
| 1167 | 6B | 1148 | XOR | B | 14F |
| 1168 | 6C | 1149 | XOR | B | 14F |
| 1169 | 6D | 1150 | XOR | B | 14F |
| 1170 | 6E | 1151 | XOR | B | 14F |
| 1171 | 6F | 1152 | XOR | B | 14F |
| 1172 | 60 | 1153 | XOR | B | 14F |
| 1173 | 61 | 1154 | XOR | B | 14F |
| 1174 | 62 | 1155 | XOR | B | 14F |
| 1175 | 63 | 1156 | XOR | B | 14F |
| 1176 | 64 | 1157 | XOR | B | 14F |
| 1177 | 65 | 1158 | XOR | B | 14F |
| 1178 | 66 | 1159 | XOR | B | 14F |
| 1179 | 67 | 1160 | XOR | B | 14F |
| 1180 | 68 | 1161 | XOR | B | 14F |
| 1181 | 69 | 1162 | XOR | B | 14F |
| 1182 | 6A | 1163 | XOR | B | 14F |
| 1183 | 6B | 1164 | XOR | B | 14F |
| 1184 | 6C | 1165 | XOR | B | 14F |
| 1185 | 6D | 1166 | XOR | B | 14F |
| 1186 | 6E | 1167 | XOR | B | 14F |
| 1187 | 6F | 1168 | XOR | B | 14F |
| 1188 | 60 | 1169 | XOR | B | 14F |
| 1189 | 61 | 1170 | XOR | B | 14F |
| 1190 | 62 | 1171 | XOR | B | 14F |
| 1191 | 63 | 1172 | XOR | B | 14F |
| 1192 | 64 | 1173 | XOR | B | 14F |
| 1193 | 65 | 1174 | XOR | B | 14F |
| 1194 | 66 | 1175 | XOR | B | 14F |
| 1195 | 67 | 1176 | XOR | B | 14F |
| 1196 | 68 | 1177 | XOR | B | 14F |
| 1197 | 69 | 1178 | XOR | B | 14F |
| 1198 | 6A | 1179 | XOR | B | 14F |
| 1199 | 6B | 1180 | XOR | B | 14F |
| 1200 | 6C | 1181 | XOR | B | 14F |
| 1201 | 6D | 1182 | XOR | B | 14F |
| 1202 | 6E | 1183 | XOR | B | 14F |
| 1203 | 6F | 1184 | XOR | B | 14F |
| 1204 | 60 | 1185 | XOR | B | 14F |
| 1205 | 61 | 1186 | XOR | B | 14F |
| 1206 | 62 | 1187 | XOR | B | 14F |
| 1207 | 63 | 1188 | XOR | B | 14F |
| 1208 | 64 | 1189 | XOR | B | 14F |
| 1209 | 65 | 1190 | XOR | B | 14F |
| 1210 | 66 | 1191 | XOR | B | 14F |
| 1211 | 67 | 1192 | XOR | B | 14F |
| 1212 | 68 | 1193 | XOR | B | 14F |
| 1213 | 69 | 1194 | XOR | B | 14F |
| 1214 | 6A | 1195 | XOR | B | 14F |
| 1215 | 6B | 1196 | XOR | B | 14F |
| 1216 | 6C | 1197 | XOR | B | 14F |
| 1217 | 6D | 1198 | XOR | B | 14F |
| 1218 | 6E | 1199 | XOR | B | 14F |
| 1219 | 6F | 1200 | XOR | B | 14F |
| 1220 | 60 | 1201 | XOR | B | 14F |
| 1221 | 61 | 1202 | XOR | B | 14F |
| 1222 | 62 | 1203 | XOR | B | 14F |
| 1223 | 63 | 1204 | XOR | B | 14F |
| 1224 | 64 | 1205 | XOR | B | 14F |
| 1225 | 65 | 1206 | XOR | B | 14F |
| 1226 | 66 | 1207 | XOR | B | 14F |
| 1227 | 67 | 1208 | XOR | B | 14F |
| 1228 | 68 | 1209 | XOR | B | 14F |
| 1229 | 69 | 1210 | XOR | B | 14F |
| 1230 | 6A | 1211 | XOR | B | 14F |
| 1231 | 6B | 1212 | XOR | B | 14F |
| 1232 | 6C | 1213 | XOR | B | 14F |
| 1233 | 6D | 1214 | XOR | B | 14F |
| 1234 | 6E | 1215 | XOR | B | 14F |
| 1235 | 6F | 1216 | XOR | B | 14F |
| 1236 | 60 | 1217 | XOR | B | 14F |
| 1237 | 61 | 1218 | XOR | B | 14F |
| 1238 | 62 | 1219 | XOR | B | 14F |
| 1239 | 63 | 1220 | XOR | B | 14F |
| 1240 | 64 | 1221 | XOR | B | 14F |
| 1241 | 65 | 1222 | XOR | B | 14F |
| 1242 | 66 | 1223 | XOR | B | 14F |
| 1243 | 67 | 1224 | XOR | B | 14F |
| 1244 | 68 | 1225 | XOR | B | 14F |
| 1245 | 69 | 1226 | XOR | B | 14F |
| 1246 | 6A | 1227 | XOR | B | 14F |
| 1247 | 6B | 1228 | XOR | B | 14F |
| 1248 | 6C | 1229 | XOR | B | 14F |
| 1249 | 6D | 1230 | XOR | B | 14F |
| 1250 | 6E | 1231 | XOR | B | 14F |
| 1251 | 6F | 1232 | XOR | B | 14F |
| 1252 | 60 | 1233 | XOR | B | 14F |
| 1253 | 61 | 1234 | XOR | B | 14F |
| 1254 | 62 | 1235 | XOR | B | 14F |
| 1255 | 63 | 1236 | XOR | B | 14F |
| 1256 | 64 | 1237 | XOR | B | 14F |
| 1257 | 65 | 1238 | XOR | B | 14F |
| 1258 | 66 | 1239 | XOR | B | 14F |
| 1259 | 67 | 1240 | XOR | B | 14F |
| 1260 | 68 | 1241 | XOR | B | 14F |
| 1261 | 69 | 1242 | XOR | B | 14F |
| 1262 | 6A | 1243 | XOR | B | 14F |
| 1263 | 6B | 1244 | XOR | B | 14F |
| 1264 | 6C | 1245 | XOR | B | 14F |
| 1265 | 6D | 1246 | XOR | B | 14F |
| 1266 | 6E | 1247 | XOR | B | 14F |
| 1267 | 6F | 1248 | XOR | B | 14F |
| 1268 | 60 | 1249 | XOR | B | 14F |
| 1269 | 61 | 1250 | XOR | B | 14F |
| 1270 | 62 | 1251 | XOR | B | 14F |
| 1271 | 63 | 1252 | XOR | B | 14F |
| 1272 | 64 | 1253 | XOR | B | 14F |
| 1273 | 65 | 1254 | XOR | B | 14F |
| 1274 | 66 | 1255 | XOR | B | 14F |
| 1275 | 67 | 1256 | XOR | B | 14F |
| 1276 | 68 | 1257 | XOR | B | 14F |
| 1277 | 69 | 1258 | XOR | B | 14F |
| 1278 | 6A | 1259 | XOR | B | 14F |
| 1279 | 6B | 1260 | XOR | B | 14F |
| 1280 | 6C | 1261 | XOR | B | 14F |
| 1281 | 6D | 1262 | XOR | B | 14F |
| 1282 | 6E | 1263 | XOR | B | 14F |
| 1283 | 6F | 1264 | XOR | B | 14F |
| 1284 | 60 | 1265 | XOR | B | 14F |
| 1285 | 61 | 1266 | XOR | B | 14F |
| 1286 | 62 | 1267 | XOR | B | 14F |
| 1287 | 63 | 1268 | XOR | B | 14F |
| 1288 | 64 | 1269 | XOR | B | 14F |
| 1289 | 65 | 1270 | XOR | B | 14F |
| 1290 | 66 | 1271 | XOR | B | 14F |
| 1291 | 67 | 1272 | XOR | B | 14F |
| 1292 | 68 | 1273 | XOR | B | 14F |
| 1293 | 69 | 1274 | XOR | B | 14F |
| 1294 | 6A | 1275 | XOR | B | 14F |
| 1295 | 6B | 1276 | XOR | B | 14F |
| 1296 | 6C | 1277 | XOR | B | 14F |
| 1297 | 6D | 1278 | XOR | B | 14F |
| 1298 | 6E | 1279 | XOR | B | 14F |
| 1299 | 6F | 1280 | XOR | B | 14F |
| 1300 | 60 | 1281 | XOR | B | 14F |
| 1301 | 61 | 1282 | XOR | B | 14F |
| 1302 | 62 | 1283 | XOR | B | 14F |
| 1303 | 63 | 1284 | XOR | B | 14F |
| 1304 | 64 | 1285 | XOR | B | 14F |
| 1305 | 65 | 1286 | XOR | B | 14F |
| 1306 | 66 | 1287 | XOR | B | 14F |
| 1307 | 67 | 1288 | XOR | B | 14F |
| 1308 | 68 | 1289 | XOR | B | 14F |
| 1309 | 69 | 1290 | XOR | B | 14F |
| 1310 | 6A | 1291 | XOR | B | |

リスト4.5 (つづき)

| | | | | |
|------|---------|------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| E01B | 97 10 | STA | <PHCNT | #4 |
| E01D | 97 14 | STA | <ZERO | #4 |
| E01F | 39 | RTS | | #5 |
| E020 | 96 08 | BEGIN | | #4 |
| E022 | 84 04 | LDA | <MODDIR | #2 |
| E024 | 27 02 | SEQ | #00000100 | #3: 1 PULSE MODE ? |
| E026 | 2E 0001 | LDX | NOPLS | #1 |
| E028 | 80 42 | ESR | PONOFF | #7: ON |
| E02D | C4 DF | ANDS | #11011111 | #2: MOTOR ON/OFF |
| E030 | 109E 04 | LDY | <PULSE | #6 |
| E031 | 9E 00 | LDX | <LOWPF | #5 |
| E033 | DC 04 | LDD | <PULSE | #5 |
| E035 | 93 06 | SUED | <ENDP | #6 |
| E037 | DD 0C | STO | <STP | #5 |
| E039 | D6 08 | LDB | <MODDIR | #4 |
| E03B | C4 01 | ANDS | #1 | #2 |
| E03D | 5C 04 | INCS | | #2 |
| E03E | CA 04 | ORS | #04 | #2 |
| E040 | D7 13 | STB | <SAVE | #4 |
| E042 | 4F | CLRA | | #2 |
| E043 | 8D 28 | BSR | PONOFF | #7: SHIFT, TIMER, PULSE-1: 67+8#X |
| E045 | 103C 0C | CMPI | <STP | #7 |
| E048 | 27 53 | BEQ | CONST | #3 |
| E04A | F6 A001 | LDB | LIMIT | #5 |
| E04D | DA 13 | ANDS | <LIMIT | #5 |
| E04F | D8 13 | EDS | <SAVE | #4 |
| E051 | 26 79 | ENE | LMTONT | #3 |
| E053 | 4C | INCA | | #2 |
| E054 | 91 09 | CMPI | <PRATE | #4 |
| E056 | 26 08 | ENE | UP1 | #3 |
| E058 | 4F | CLRA | | #2 |
| E059 | D6 04 | LDB | <RRATE | #4 |
| E05B | 50 | NEGB | | #2 |
| E05C | 30 85 | LEAX | | #5 |
| E05E | 20 E3 | BRA | UP | #3 |
| E060 | 34 02 | DELAY | ROUTINE *** | #5 |
| E062 | 25 02 | PSHS | A | #6 |
| E064 | 7E E043 | JMS | UP | #4 |
| E067 | 15 0000 | MOVLMT | DELAY | #5 |
| E06A | 16 0047 | DELAY | LMTCHK | #5 |
| E06E | | SUBROUTINE | (PHASE SHIFT, TIMER, PULSE-1) | |
| E070 | | *** 6C+8#X | | |
| E072 | D6 08 | PONOFF | <MODDIR | #4 |
| E074 | C4 01 | ANDS | #1 | #2 |
| E076 | 27 1B | BEQ | PHCV | #3 |
| E078 | D6 10 | LDB | <PHCNT | #4 |
| E07A | 5C | INCS | | #2 |
| E07C | D1 11 | CMPE | <CNTMAX | #4 |
| E07E | 2F 1D | SLE | PHCV1 | #3 |
| E07F | D6 14 | ANDS | <ZERO | #4: CLS |
| E080 | D7 10 | STB | <PHCNT | #4 |

リスト4.5 相励磁を含むパルス発生プログラム (6809 用)

| | | | | |
|------|------|-------|-------|--|
| 0000 | 0000 | RAM | #0000 | |
| 0001 | 0000 | ROM | #0000 | |
| 0002 | 0000 | ORG | RAM | |
| 0003 | 0000 | ENTRY | ***** | |
| 0004 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0005 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0006 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0007 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0008 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0009 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0010 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0011 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0012 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0013 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0014 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0015 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0016 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0017 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0018 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0019 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0020 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0021 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0022 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0023 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0024 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0025 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0026 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0027 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0028 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0029 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0030 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0031 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0032 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0033 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0034 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0035 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0036 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0037 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0038 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0039 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0040 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0041 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0042 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0043 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0044 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0045 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0046 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0047 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0048 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0049 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0050 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0051 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0052 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0053 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0054 | 0000 | RMB | ***** | |
| 0055 | 0000 | RMB | ***** | |

リスト4.5 (つづき)

| | | | | | | |
|------|---------|-------|-------|-----------------|-----------------------------------|----------------|
| E07E | E6 C5 | 0111 | LDB | B,U | #5 | #5:PHASE SHIFT |
| E080 | F7 A000 | 0112 | STX | POUT | #5 | |
| E082 | 9F 0E | 0113 | STB | WORK | #5 | |
| E085 | 20 1F | 0114 | LEAX | SPEED | #5 | |
| E087 | 28 FC | E085* | SNE | WORK | #5 | |
| E089 | 8E 0E | 0115 | LDX | WORK | #5 | |
| E08B | 31 3F | 0116 | LEAY | -1,Y | #5 | |
| E08D | 33 | 0117 | RTS | | #5 | |
| E08E | D6 10 | 0118 | | | #5 | |
| E090 | 5A | 0119 | LDB | PHCNT | #5 | |
| E091 | 2A 07 | 0120 | DECB | | #5 | |
| E093 | D6 11 | 0121 | BPL | PHCV2 | #5 | |
| E095 | 20 E5 | E09A* | LDB | CNTHAX | #5 | |
| E097 | 7E E07C | E07C* | LDB | PHSFT | #5 | |
| E09A | 7E E085 | 0122 | PHCW1 | PHSFT | #5 | |
| E09B | | 0123 | PHCV2 | PHCW1 | #5 | |
| E09C | | 0124 | | | #5 | |
| E09D | | 0125 | | | #5 | |
| E09E | | 0126 | | | #5 | |
| E09F | | 0127 | | | #5 | |
| E0A0 | 9E 02 | 0128 | LDB | PHCNT | #5 | |
| E0A2 | 34 7F | 0129 | PSHS | CC,A,B,DP,X,Y,U | #15 | |
| E0A4 | 35 7F | 0130 | PULS | CC,A,B,DP,X,Y,U | #15 | |
| E0A6 | 20 00 | E0A5* | ERA | CONST1 | #3 | |
| E0A8 | | E0A7* | ERA | FLAT | #3 | |
| E0AA | | 0131 | BSR | PONOFF | #7:SHIFT,TIMER, PULSE-1:67*8*4 | |
| E0AC | | 0132 | | | | |
| E0AD | 8D C4 | E0B0* | LDA | #2 | | |
| E0AE | 96 08 | 0133 | AND | MOVLMT | | |
| E0AF | 84 02 | E0B7* | BNE | DOWN | | |
| E0B0 | 28 B8 | 0134 | CMPL | LIMIT | | |
| E0B2 | 109C 06 | E0E4* | REQ | LIMIT | | |
| E0B4 | 27 30 | 0135 | LDB | SAVEB | | |
| E0B6 | F6 A001 | 0136 | AND | SAVEB | | |
| E0B8 | D4 13 | 0137 | AND | LTON | | |
| E0BA | 08 12 | 0138 | BNE | A | | |
| E0BC | 28 1E | E0B8* | PSHS | FLAT | | |
| E0BE | 34 02 | 0139 | PULS | | | |
| E0C0 | 35 02 | 0140 | JMP | | | |
| E0C2 | 7E E0A7 | 0141 | | | | |
| E0C4 | 34 7F | 0142 | PSHS | CC,A,B,DP,X,Y,U | #15 | |
| E0C6 | 35 7F | 0143 | PULS | CC,A,B,DP,X,Y,U | #15 | |
| E0C8 | 12 | 0144 | NOP | | | |
| E0CA | 7E E0E9 | 0145 | JMP | SLOW | | |
| E0CC | C4 04 | 0146 | | | | |
| E0CE | 26 32 | 0147 | AND | #04 | | |
| E0D0 | 109F 15 | 0148 | STY | STOP | | |
| E0D2 | DC 04 | E102* | LDD | SAVEP | | |
| E0D4 | 93 15 | 0149 | SUBD | PULSE | | |
| E0D6 | 1F 02 | 0150 | TFR | D,Y | | |
| E0D8 | 20 00 | 0151 | ERA | DOWN1 | | |
| E0DA | C4 04 | 0152 | AND | #04 | | |
| E0DC | 28 23 | 0153 | BNE | STOP | | |
| E0DE | 109E 06 | 0154 | LDY | DOWN1 | | |
| E0E0 | 34 7F | 0155 | PSHS | CC,A,B,DP,X,Y,U | #15 | |
| E0E2 | 20 04 | E102* | LDB | DOWN1 | | |
| E0E4 | 34 7F | 0156 | PSHS | CC,A,B,DP,X,Y,U | #15 | |
| E0E6 | 35 7F | E0E3* | PULS | | | |

リスト4.5 (つづき)

| | | | | | | |
|------|----------------|-------|-------|--------|----|--|
| E0E8 | 4F | 0156 | DOWN1 | CLRA | #2 | |
| E0EA | 17 FF81 | E0E0* | SLOW | LEBR | #2 | |
| E0EC | 108C 0000 | 0157 | | | | |
| E0ED | 27 10 | 0158 | | | | |
| E0EF | 4C | E102* | CMPL | #0 | | |
| E0F0 | 91 09 | 0159 | INCA | STOP | | |
| E0F2 | 26 CD | 0160 | CMPL | PREATE | | |
| E0F4 | 4F | E0C4* | BNE | SLOW | | |
| E0F6 | D6 0A | 0161 | CLRA | LEBR | | |
| E0F8 | 30 85 | 0162 | LDB | LEBR | | |
| E0FA | 34 30 | 0163 | PSHS | B,X | | |
| E0FC | 35 30 | 0164 | PULS | X,Y | | |
| E0FE | 20 E7 | E0E9* | BRA | SLOW | | |
| E100 | C4 DF | 0165 | STOP | AND | | |
| E102 | F7 A000 | 0166 | RTS | RTS | | |
| E104 | 39 | 0167 | | | | |
| E106 | E114 | 0168 | | | | |
| E108 | E117 | 0169 | | | | |
| E10A | 222625 | 0170 | | | | |
| E10C | 212322262425 | 0171 | | | | |
| E10E | 23262C29 | 0172 | | | | |
| E110 | 21232226242C28 | 0173 | | | | |
| E112 | 23262C2831 | 0174 | | | | |
| E114 | 2327262C2C38 | 0175 | | | | |
| E116 | 020503070409 | 0176 | | | | |
| E118 | | 0177 | | | | |
| E11A | | 0178 | | | | |
| E11C | | 0179 | | | | |
| E11E | | 0180 | | | | |
| E120 | | 0181 | | | | |
| E122 | | 0182 | | | | |
| E124 | | 0183 | | | | |
| E126 | | 0184 | | | | |
| E128 | | 0185 | | | | |
| E12A | | 0186 | | | | |
| E12C | | 0187 | | | | |
| E12E | | 0188 | | | | |
| E130 | | 0189 | | | | |
| E132 | | 0190 | | | | |
| E134 | | 0191 | | | | |
| E136 | | 0192 | | | | |
| E138 | | 0193 | | | | |
| E13A | | 0194 | | | | |
| E13C | | 0195 | | | | |
| E13E | | 0196 | | | | |
| E140 | | 0197 | | | | |

xxxx SYMBOL TABLE xxxx

| | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|---------|------|---------|------|
| E020 | E0E4 | DOWN | E0E4 | CONST | E0A5 | INIT | E08A |
| BEGIN | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | HPR | 0002 | INIT | E080 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | LOPR | 0000 | MAXBL | E138 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV1 | E037 | PHCV1 | E010 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV2 | E03D | PHCV2 | E060 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV3 | E042 | PHCV3 | E123 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV4 | E049 | PHCV4 | E125 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV5 | E04F | PHCV5 | E127 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV6 | E055 | PHCV6 | E129 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV7 | E05B | PHCV7 | E131 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV8 | E060 | PHCV8 | E133 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV9 | E067 | PHCV9 | E135 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV10 | E06D | PHCV10 | E137 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV11 | E072 | PHCV11 | E139 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV12 | E079 | PHCV12 | E141 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV13 | E086 | PHCV13 | E143 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV14 | E08C | PHCV14 | E145 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV15 | E091 | PHCV15 | E147 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV16 | E098 | PHCV16 | E149 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV17 | E0A5 | PHCV17 | E151 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV18 | E0AB | PHCV18 | E153 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV19 | E0B0 | PHCV19 | E155 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV20 | E0B7 | PHCV20 | E157 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV21 | E0BD | PHCV21 | E159 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV22 | E0C2 | PHCV22 | E161 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV23 | E0C9 | PHCV23 | E163 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV24 | E0CE | PHCV24 | E165 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV25 | E0D3 | PHCV25 | E167 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV26 | E0D9 | PHCV26 | E169 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV27 | E0DE | PHCV27 | E171 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV28 | E0E3 | PHCV28 | E173 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV29 | E0E8 | PHCV29 | E175 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV30 | E0ED | PHCV30 | E177 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV31 | E0F2 | PHCV31 | E179 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV32 | E0F8 | PHCV32 | E181 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV33 | E0FD | PHCV33 | E183 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV34 | E102 | PHCV34 | E185 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV35 | E108 | PHCV35 | E187 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV36 | E10D | PHCV36 | E189 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV37 | E111 | PHCV37 | E191 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV38 | E117 | PHCV38 | E193 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV39 | E11C | PHCV39 | E195 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV40 | E120 | PHCV40 | E197 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV41 | E126 | PHCV41 | E199 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV42 | E133 | PHCV42 | E201 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV43 | E139 | PHCV43 | E203 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV44 | E145 | PHCV44 | E205 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV45 | E151 | PHCV45 | E207 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV46 | E157 | PHCV46 | E209 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV47 | E163 | PHCV47 | E211 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV48 | E169 | PHCV48 | E213 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV49 | E175 | PHCV49 | E215 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV50 | E181 | PHCV50 | E217 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV51 | E187 | PHCV51 | E219 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV52 | E193 | PHCV52 | E221 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV53 | E199 | PHCV53 | E223 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV54 | E205 | PHCV54 | E225 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV55 | E211 | PHCV55 | E227 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV56 | E217 | PHCV56 | E229 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV57 | E223 | PHCV57 | E231 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV58 | E229 | PHCV58 | E233 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV59 | E235 | PHCV59 | E235 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV60 | E241 | PHCV60 | E237 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV61 | E247 | PHCV61 | E239 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV62 | E253 | PHCV62 | E241 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV63 | E259 | PHCV63 | E243 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV64 | E265 | PHCV64 | E245 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV65 | E271 | PHCV65 | E247 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV66 | E277 | PHCV66 | E249 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV67 | E283 | PHCV67 | E251 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV68 | E289 | PHCV68 | E253 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV69 | E295 | PHCV69 | E255 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV70 | E301 | PHCV70 | E257 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV71 | E307 | PHCV71 | E259 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV72 | E313 | PHCV72 | E261 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV73 | E319 | PHCV73 | E263 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV74 | E325 | PHCV74 | E265 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV75 | E331 | PHCV75 | E267 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV76 | E337 | PHCV76 | E269 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV77 | E343 | PHCV77 | E271 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV78 | E349 | PHCV78 | E273 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV79 | E355 | PHCV79 | E275 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV80 | E361 | PHCV80 | E277 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV81 | E367 | PHCV81 | E279 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV82 | E373 | PHCV82 | E281 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV83 | E379 | PHCV83 | E283 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV84 | E385 | PHCV84 | E285 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV85 | E391 | PHCV85 | E287 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV86 | E397 | PHCV86 | E289 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV87 | E403 | PHCV87 | E291 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV88 | E409 | PHCV88 | E293 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV89 | E415 | PHCV89 | E295 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV90 | E421 | PHCV90 | E297 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV91 | E427 | PHCV91 | E299 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV92 | E433 | PHCV92 | E301 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV93 | E439 | PHCV93 | E303 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV94 | E445 | PHCV94 | E305 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV95 | E451 | PHCV95 | E307 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV96 | E457 | PHCV96 | E309 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV97 | E463 | PHCV97 | E311 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV98 | E469 | PHCV98 | E313 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV99 | E475 | PHCV99 | E315 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV100 | E481 | PHCV100 | E317 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV101 | E487 | PHCV101 | E319 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV102 | E493 | PHCV102 | E321 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV103 | E499 | PHCV103 | E323 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV104 | E505 | PHCV104 | E325 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV105 | E511 | PHCV105 | E327 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV106 | E517 | PHCV106 | E329 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV107 | E523 | PHCV107 | E331 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV108 | E529 | PHCV108 | E333 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV109 | E535 | PHCV109 | E335 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV110 | E541 | PHCV110 | E337 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV111 | E547 | PHCV111 | E339 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV112 | E553 | PHCV112 | E341 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV113 | E559 | PHCV113 | E343 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV114 | E565 | PHCV114 | E345 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV115 | E571 | PHCV115 | E347 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV116 | E577 | PHCV116 | E349 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV117 | E583 | PHCV117 | E351 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV118 | E589 | PHCV118 | E353 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV119 | E595 | PHCV119 | E355 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV120 | E601 | PHCV120 | E357 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV121 | E607 | PHCV121 | E359 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV122 | E613 | PHCV122 | E361 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV123 | E619 | PHCV123 | E363 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV124 | E625 | PHCV124 | E365 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV125 | E631 | PHCV125 | E367 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV126 | E637 | PHCV126 | E369 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV127 | E643 | PHCV127 | E371 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV128 | E649 | PHCV128 | E373 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV129 | E655 | PHCV129 | E375 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV130 | E661 | PHCV130 | E377 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV131 | E667 | PHCV131 | E379 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV132 | E673 | PHCV132 | E381 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV133 | E679 | PHCV133 | E383 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV134 | E685 | PHCV134 | E385 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV135 | E691 | PHCV135 | E387 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV136 | E697 | PHCV136 | E389 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV137 | E703 | PHCV137 | E391 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV138 | E709 | PHCV138 | E393 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV139 | E715 | PHCV139 | E395 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV140 | E721 | PHCV140 | E397 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV141 | E727 | PHCV141 | E399 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV142 | E733 | PHCV142 | E401 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV143 | E739 | PHCV143 | E403 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV144 | E745 | PHCV144 | E405 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV145 | E751 | PHCV145 | E407 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV146 | E757 | PHCV146 | E409 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV147 | E763 | PHCV147 | E411 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV148 | E769 | PHCV148 | E413 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV149 | E775 | PHCV149 | E415 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV150 | E781 | PHCV150 | E417 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV151 | E787 | PHCV151 | E419 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV152 | E793 | PHCV152 | E421 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV153 | E799 | PHCV153 | E423 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV154 | E805 | PHCV154 | E425 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV155 | E811 | PHCV155 | E427 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV156 | E817 | PHCV156 | E429 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV157 | E823 | PHCV157 | E431 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV158 | E829 | PHCV158 | E433 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV159 | E835 | PHCV159 | E435 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV160 | E841 | PHCV160 | E437 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV161 | E847 | PHCV161 | E439 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV162 | E853 | PHCV162 | E441 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV163 | E859 | PHCV163 | E443 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV164 | E865 | PHCV164 | E445 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV165 | E871 | PHCV165 | E447 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV166 | E877 | PHCV166 | E449 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV167 | E883 | PHCV167 | E451 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV168 | E889 | PHCV168 | E453 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV169 | E895 | PHCV169 | E455 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV170 | E901 | PHCV170 | E457 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV171 | E907 | PHCV171 | E459 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV172 | E913 | PHCV172 | E461 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV173 | E919 | PHCV173 | E463 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV174 | E925 | PHCV174 | E465 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV175 | E931 | PHCV175 | E467 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV176 | E937 | PHCV176 | E469 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV177 | E943 | PHCV177 | E471 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV178 | E949 | PHCV178 | E473 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV179 | E955 | PHCV179 | E475 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV180 | E961 | PHCV180 | E477 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV181 | E967 | PHCV181 | E479 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV182 | E973 | PHCV182 | E481 |
| DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | DOWN1 | PHCV183 | E9 | | |